

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Загорских Ольги Анатольевны
«ФОРМИРОВАНИЕ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ТРУБ ИЗ
АУСТЕНИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ФРЕТТИНГ-
КОРРОЗИИ»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и
сплавов

Диссертационная работа Загорских Ольги Анатольевны посвящена разработке режимов финишной поверхностной обработки труб для повышения долговечности трубопроводов из аустенитной нержавеющей стали, работающих в условиях фреттинг-коррозии.

Актуальность темы. Фреттинг-коррозия и фреттинг-усталость являются основной причиной снижения долговечности и эксплуатационной надежности соединений деталей. Поэтому повышение фреттинг-стойкости поверхностей контактирующих деталей технологическими способами с применением методов поверхностной обработки является одной из актуальных задач современного машиностроительного производства. Аустенитные нержавеющие стали, несмотря на высокую коррозионную стойкость, также подвержены фреттинг-коррозии, поскольку микроперемещения вызывают разрушение защитных оксидных пленок на поверхности стали, что способствует развитию коррозионного процесса. В свою очередь, фреттинг-коррозия способствует возникновению микротрещин, которые инициируют фреттинг-усталость, что приводит к преждевременному выходу изделий из строя. В этой связи, диссертационная работа Загорских О.А., в которой рассматривается формирование упрочненного слоя на поверхности труб из аустенитной нержавеющей стали для защиты от фреттинг-коррозии и фреттинг-усталости, безусловно, является актуальной.

Оценка содержания диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, основных выводов, списка сокращений и условных обозначений и списка использованной литературы. Работа изложена на 143 страницах, включая 42 рисунка и 18 таблиц. Список использованной литературы содержит 96 наименований.

Во введении проведен анализ причин наблюдаемого снижения долговечности штатных трубопроводов из нержавеющей стали 12X18H10T и обоснована актуальность темы

диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту, отмечены личный вклад автора, степень достоверности и апробация результатов, представлена структура диссертации.

В первой главе диссертант представляет аналитический обзор литературных источников, в котором проанализированы теоретические аспекты фреттинга; реологические и электрохимические процессы, которые протекают в зоне контакта сопряжённых поверхностей; роль твердости, шероховатости поверхности и контактного давления в посадках с натягом; существующие способы повышения фреттинг-стойкости контактирующих деталей, а также методы испытаний на фреттинг-коррозию и фреттинг усталость; влияние поверхностного упрочнения на структуру, фазовый состав и усталостную прочность аустенитных нержавеющей сталей. Выполнена постановка цели и задач исследования.

Во второй главе рассмотрены методологические основы работы, методы проведения испытаний и измерений, а также структурных исследований. Приведен подробный перечень оборудования с данными сертификатов о поверке и калибровке, что дополнительно подтверждает достоверность полученных результатов. Следует подчеркнуть, что виброиспытания образцов с двусторонним зажатием труб штатными прокладками, наиболее приближенные к эксплуатационным, проводились по схеме и в приспособлении, разработанными в АО «ОДК-Авиадвигатель». Исследовали образцы труб 8×1 мм из высоколегированной нержавеющей аустенитной стали марки 12X18H10T по ГОСТ 19277-2016 обычной точности изготовления, используемые для изготовления штатных трубопроводов, и повышенной точности изготовления как возможная альтернатива штатным трубопроводам. Образцы подвергали поверхностной механической (финишной) обработке по различным режимам. Проведены механические испытания на растяжение и сплющивание, а также испытания на стойкость к межкристаллитной коррозии, которые показали, что свойства всех образцов соответствуют нормативным документам. При этом установлено, что поверхностная обработка по различным режимам не оказала влияние на уровень механических свойств образцов относительно исходного шлифованного состояния.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию шероховатости поверхности, микротвердости и остаточных напряжений образцов труб с различными вариантами финишной обработки. Показано, что шероховатость образцов и наружный

диаметр до и после дополнительной обработки соответствуют нормативным документам. В результате проведенных исследований установлено, что наилучшим режимом финишной обработки труб из нержавеющей стали 12X18Н10Т является поверхностная деформационная гидродробеструйная обработка стеклянной дробью фракцией 0,3-0,4 мм (30 % в суспензии) при давлении воздуха 0,1 МПа с вращением образцов, расстоянием до обрабатываемой поверхности 35 мм, углом обработки 90 градусов в течении 30 секунд. Данный режим обработки поверхности обеспечивает создание упрочненного слоя глубиной 80 мкм с параметрами шероховатости $Ra = (0,92-1,17)$ мкм, $Rz = 6,32$ мкм, микротвердостью 346 HV0,025 (на глубине 0,02 мм) и средним уровнем остаточных сжимающих напряжений порядка -482 МПа. Кроме того, обработка по данному режиму улучшает микрогеометрию наружной поверхности труб и полностью устраняет грубые кольцевые риски, образовавшиеся после круглой шлифовки при изготовлении труб.

В четвертой главе рассмотрены результаты циклических испытаний соединений из стали 12X18Н10Т с различными вариантами финишной обработки. Приведена методика испытаний, а также использованное испытательное и измерительное оборудование, показана схема испытаний и наклейки тензорезисторов. Виброиспытания проводили на базе 20 млн. циклов в три этапа. На этапах 1 и 2 испытывали образцы с консольным зажатием в замке, соответственно, в условиях, исключающих фреттинг-коррозию, и в условиях возникновения фреттинг-коррозии. На этапе 3 испытывали образцы с двусторонним зажатием труб штатными прокладками, то есть в условиях, наиболее приближенных к условиям эксплуатации. Проведенные исследования показали, что были полностью воспроизведены повреждаемость и выработка твердосмазочного покрытия на сопряженных поверхностях подкрепляющих прокладок, а также появление очагов фреттинг-коррозии, аналогичных очагам, наблюдаемым при эксплуатации. Установлено, что в ходе циклических испытаний при заданном напряжении, наибольшее число циклов до разрушения в условиях появления очагов фреттинг-коррозии выдержали образцы труб, подвергнутые поверхностной деформационной гидродробеструйной обработке стеклянной дробью по предлагаемому режиму. Упрочненные образцы также продемонстрировали наибольший предел выносливости при испытаниях в условиях, исключающих фреттинг-коррозию.

В пятой главе представлены результаты фрактографического анализа образцов труб после испытаний на фреттинг-коррозию и фреттинг-усталость, а также результаты исследования морфологии, элементного и структурно-фазового состава измененного слоя. Показано, что очаговые зоны развития усталостных трещин на шлифованных образцах,

разрушенных при усталостных испытаниях на этапе 1, совпадали с отдельными кольцевыми рисками на поверхности труб, образовавшимися на операциях круглой шлифовки при изготовлении труб у поставщиков. При этом очагами зарождения усталостных трещин при испытании образцов различного исполнения (шлифованных и упрочненных) на этапе 2 являлись участки фреттинг-коррозии. Минимальные участки фреттинг-коррозии наблюдаются даже на поверхности упрочненных труб, выдержавших максимальное количество циклов до разрушения при усталостных испытаниях. В участках фреттинг-коррозии обнаружен измененный дискретный слой глубиной до 10 мкм с повышенным (до 34%) содержанием кислорода. Исследование сформированного при гидродробеструйной обработки упрочненного поверхностного слоя показало, что в данном слое произошел фазовый ГЦК-ОЦК переход с образованием мартенсита деформации (α') в количестве 27 об.%. На основании полученных в работе результатов проведено математическое моделирование и получена зависимость числа циклов до разрушения образцов труб из нержавеющей аустенитной стали, работающих в условиях фреттинг-коррозии, от микротвердости, глубины упрочненного слоя, величины остаточных напряжений и шероховатости поверхности.

В шестой главе выполнена практическая оценка технологической целесообразности применения поверхностной деформационной гидродробеструйной обработки стеклянной дробью в условиях производства. С этой целью выполнены операции развальцовки и гибки труб из аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T согласно серийному техпроцессу. Установлено, что финишная упрочняющая обработка по предлагаемому режиму может быть рекомендована для прямолинейных участков труб (например, по местам крепления поддерживающими прокладками). Для участков труб, подвергаемых гибке и развальцовке, такая обработка возможна только после проведения формообразующих операций, поскольку такие операции приводят к образованию микронадрывов упрочненного слоя. Дополнительный нагрев упрочненных образцов до 300 °С, проведенный для оценки стабильности уровня остаточных напряжений, сформированных при гидродробеструйной обработке, и в качестве мероприятия, направленного на повышение технологичности труб при гибке и развальцовке, показал сохранение сжимающих напряжений на достаточно высоком уровне. Однако нагрев не предотвратил образование локальных микронадрывов упрочненного слоя на наружном радиусегиба (на угол 90 градусов), хотя по месту развальцовки (вблизи торца) продольные микронадрывы на поверхности трубы не были выявлены.

Научная новизна результатов работы. Наиболее важным научным результатом работы является установленное положительное влияние упрочненного слоя, сформированного с помощью поверхностной деформационной гидродробеструйной обработки стеклянной дробью, на устойчивость аустенитной нержавеющей стали 12X18Н10Т к фреттинг-коррозии и фреттинг-усталости. Важным результатом является также полученная зависимость числа циклов до разрушения образцов труб из нержавеющей аустенитной стали, работающих в условиях фреттинг-коррозии, от микротвердости, глубины упрочненного слоя, величины остаточных напряжений и шероховатости поверхности.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы. Предложен теоретически обоснованный подход для оценки циклической долговечности образцов труб из нержавеющей аустенитной стали, работающих в условиях фреттинг-коррозии, с использованием измеряемых значений микротвердости, глубины упрочненного слоя, величины остаточных напряжений и шероховатости поверхности.

В работе убедительно показано, что поверхностная деформационная гидродробеструйная обработка стеклянной дробью может быть использована для повышения долговечности трубопроводов из аустенитной нержавеющей стали, работающих в условиях фреттинг-коррозии. Результаты диссертационной работы внедрены в экспериментальную базу АО «ОДК-ПМ» и АО «ОДК-Авиадвигатель» и принято решение о подконтрольной эксплуатации упрочненных по предлагаемой технологии трубопроводов (по местам крепления втулками) на газогенераторах.

Достоверность результатов работы. Достоверность и обоснованность полученных в работе экспериментальных результатов, научных положений и выводов в целом не вызывают сомнений и обеспечены большим объемом выполненных экспериментов, использованием проверенных и оригинальных методов испытаний материалов, современных методов структурного и фазового анализа, а также сертифицированного аналитического и испытательного оборудования. Результаты, полученные разными методами, согласованы и взаимно дополняют друг друга.

Личный вклад автора. Диссертационная работа является результатом исследовательской работы автора в АО «ОДК-ПМ». Диссертанту принадлежит основная роль в постановке цели и задач исследования, в выборе путей и методов их решения. Все этапы экспериментальной работы проведены при непосредственном участии диссертанта. Диссертантом лично изучены все обрабатываемые и испытываемые образцы, построены

графики и установлены зависимости, интерпретированы результаты исследований и написаны научные статьи, подготовлена база данных, связывающая режим упрочнения, уровень остаточных напряжений и поверхностной микротвердости образцов с их фазовым составом и повышением усталостной прочности в условиях фреттинг-коррозии и фреттинг-усталости.

Замечания по работе:

1. Структура диссертационной работы несколько затрудняет ее прочтение. В частности, имеется достаточно много абзацев, которые состоят из одного предложения. Нумерация литературных источников не соответствует порядку их первого упоминания в тексте. В литературном обзоре в некоторых местах целесообразно было бы привести поясняющие текст иллюстрации. Следовало бы все методики исследований привести во второй главе диссертации, а результаты механических и коррозионных испытаний перенести из второй главы в третью. Несколько неудачным представляется название третьей главы, которое не соответствует ее содержанию. Отсутствуют выводы по главам.

2. Представленные в работе данные, в частности, о распределении микротвердости по глубине (глава 3), свидетельствуют о том, что в результате гидродробеструйной обработки стеклянной дробью был сформирован градиентный упрочненный слой. Однако этот факт не был отмечен. Известно, что использование поверхностного упрочнения наиболее эффективно для повышения контактной выносливости металлических материалов при формировании градиентного упрочненного слоя. Поэтому, целесообразно было бы обсудить, как градиентный упрочненный слой может влиять на фреттинг-стойкость сталей в целом и аустенитной нержавеющей стали в частности.

3. Проведенные исследования показали, что упрочненный слой, хотя и в меньшей степени, подвергается фреттинг-коррозии, следовательно, он также будет деградировать в процессе эксплуатации и разрушение начнет развиваться по глубинным слоям материала. Поэтому следовало было бы провести оценку ресурса усовершенствованного подобным образом трубопровода.

4. Целесообразно было бы привести схему, описывающую четкую последовательность действий по назначению технологических параметров гидродробеструйной обработки при выборе другой марки стали (другого материала).

5. Следовало бы более полно раскрыть научную новизну.

6. Существует некоторая двусмысленность при использовании термина «измененный слой», который можно трактовать как упрочненный (модифицированный) слой, так и слой, образовавшийся в результате фреттинг-коррозии.

7. В главе 2 следовало бы привести методику определения остаточных напряжений по глубине и формулу для расчета степени наклепа.

8. В ряде случаев следовало бы провести более детальный анализ полученных результатов. В частности, указать возможные причины, почему:

- наблюдается достаточно низкий уровень остаточных напряжений после гидроабразивной обработки (с. 82);
- наблюдаются расхождения в величине напряжений, определенных различными методами, и указать, какой метод дает наиболее достоверные результаты (с. 72-82).

9. Утверждается, что (с. 16) «в работах [34, 70] авторы отмечают, что, когда контактные пары деталей подвержены колебательному перемещению друг относительно друга амплитудой менее 10 мкм фреттинг-износ проявляться не будет»; (с. 19) «для инициирования процесса фреттинга достаточно микроскопических взаимных перемещений (при скольжении или колебании), измеряемых нанометрами». Данное противоречие необходимо пояснить.

10. Следует пояснить, почему в таблице 3.1 значения параметра шероховатости R_a указаны в виде диапазона, а параметра R_z как среднее значение.

11. На рисунках 3.14 и 3.15, по видимому, неправильно указана единица измерения по оси абсцисс (должна быть мм).

Высказанные замечания не меняют в целом, безусловно, положительную оценку представленной работы, включая ее научное и практическое содержание.

Заключение. Диссертационная работа Загорских О.А. представляет собой законченное исследование. Содержание диссертации отражено в 11 публикациях, в том числе в 4 статьях, опубликованных в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ, из них 1 статья в журнале, индексируемом международными базами цитирования Scopus и WoS. Материалы диссертации обсуждены на 7 конференциях различного уровня. Содержание автореферата соответствует положениям диссертации. Полученные результаты имеют большое значение для развития научных и методологических основ повышения фреттинг-стойкости поверхностей контактирующих деталей за счет поверхностной обработки. Выводы и практические рекомендации работы могут быть использованы при назначении технологических параметров упрочняющей поверхностной обработки труб из аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T для защиты от фреттинг-коррозии и фреттинг-усталости, в том числе на таких предприятиях, как АО «ОДК-ПМ» и АО «ОДК-Авиадвигатель».

В целом по актуальности решаемых задач, научной новизне, практической значимости, достоверности полученных результатов и обоснованности выводов, диссертационная работа «Формирование упрочненного слоя на поверхности труб из аустенитной нержавеющей стали для защиты от фреттинг-коррозии» соответствует 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 диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Загорских Ольга Анатольевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Официальный оппонент,
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова
Уральского отделения Российской академии наук
(ИМАШ УрО РАН)



Саврай
Роман Анатольевич

29 июля 2025 г.

620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, д. 34;
Тел. +7 (343) 374-47-25, E-mail: ras@imach.uran.ru

«Подпись Р.А. Саврая заверяю»
Главный специалист по кадрам

