

Научная статья

УДК 669.15:621.787

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-1-19-29

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБ ИЗ СТАЛИ 12X18H10T С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ*А.Б. Лаптев¹, О.А. Загорских², А.С. Федоров³, И.А. Голубев³*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

²Акционерное общество «ОДК-Пермские моторы», Пермь, Россия; pmz@pmz.ru

³Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия; office@spbstu.ru

Аннотация. В процессе эксплуатации турбореактивных двигателей трубопроводы внешней обвязки подвержены усталостному разрушению, вызванному фреттинг-коррозией. Приведены результаты построения модели изменения стойкости труб размером 8×1 мм из стали 12X18H10T к фреттинг-коррозии после различных видов обработки. Показано, что максимальная стойкость к фреттинг-коррозии достигается при твердости $HV_{0,025} = 2510$ МПа, глубине измененного слоя >44 мкм, величине средних сжимающих остаточных напряжений >208,5 МПа и шероховатости $R_a < 1,18$ мкм.

Ключевые слова: фреттинг-коррозия, фреттинг-усталость, нержавеющая сталь, упрочнение поверхности, оптимизация, регрессионная модель

Для цитирования: Лаптев А.Б., Загорских О.А., Федоров А.С., Голубев И.А. Оптимизация параметров упрочнения поверхности труб из стали 12X18H10T с использованием регрессионной модели // Труды ВИАМ. 2026. № 1 (155). С. 19–29. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-1-19-29.

Scientific article

OPTIMIZATION OF THE SURFACE HARDENING PARAMETERS FOR 12X18H10T STEEL PIPES USING A REGRESSION MODEL*A.B. Laptev¹, O.A. Zagorskikh², A.S. Fedorov³, I.A. Golubev³*

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

²Joint Stock Company «UEC-Perm Engines», Perm, Russia; pmz@pmz.ru

³Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia; office@spbstu.ru

Abstract. During the operation of turbojet engines, the pipelines of the external systems are subject to fatigue failure caused by fretting corrosion. The article presents the results of developing a model describing the change in the resistance of 8×1 mm pipes made of 12X18H10T steel to fretting corrosion after various types of processing. It is shown that maximum resistance to fretting corrosion is achieved at: microhardness $HV_{0,025} = 2510$ MPa, modified layer depth greater than 44 microns, average compressive residual stresses greater than 208,5 MPa and roughness, R_a less than 1,18 microns.

Keywords: fretting corrosion, fretting fatigue, stainless steel, surface hardening, optimization, regression model

For citation: Laptev A.B., Zagorskikh O.A., Fedorov A.S., Golubev I.A. Optimization of the surface hardening parameters for 12X18H10T steel pipes using a regression model. *Trudy VIAM*, 2026, no. 1 (155), pp. 19–29. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-1-19-29.

Введение

Одной из основных причин зарождения большинства усталостных дефектов, приводящих к поломкам деталей при эксплуатации, является фреттинг-износ или фреттинг-коррозия (ФК) [1]. Опыт эксплуатации показывает, что, например, при работе лопаток газотурбинных двигателей с бандажными и антивибрационными полками с течением времени предварительный натяг на полках исчезает, постепенно может появиться зазор. Его образование приводит к увеличению амплитуды виброперемещений и величины переменных напряжений пера, что снижает вибрационную прочность и приводит к усталостной поломке.

Переменный характер нагрузок при эксплуатации (вибрация, пульсирующие или ударные нагрузки, скручивающие нагрузки под действием крутильных колебаний и т. п.) может вызвать взаимные механические колебания контактирующих деталей и их локальные смещения, которые, в свою очередь, приводят к развитию ФК и фреттинг-усталости.

В процессе эксплуатации трубопроводов внешней обвязки турбореактивных двигателей имеют место случаи усталостных разрушений труб из высоколегированных сталей типа 12Х18Н10Т, работающих при температуре $>250\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1, 2]. Разрушение труб вызвано ФК в результате трения между колодочным хомутом и трубкой из-за вибрации и попадания коррозионной среды (рис. 1) [3–6]. Нарботка трубопроводов до момента усталостного разрушения может снижаться до 1200 ч.



Рис. 1. Фреттинг-коррозия на поверхности трубы (а, в, з) и вид излома (з, д) по направлению усталостной трещины, образовавшейся при контакте с хомутом (б)

Согласно работе [7], ФК – это процесс, возникающий при циклическом нагружении в зоне контакта деталей, образующих между собой прессовые или малоподвижные соединения (болтовые, шлицевые, замковые и др., а также соединения в электрических контактах). Величина амплитуды относительных перемещений деталей в зоне контакта, достаточная для возникновения процесса, находится в пределах упругих деформаций поверхностного слоя детали. Согласно работе [8], амплитуда взаимных смещений контртел сопоставима с расстоянием между вершинами микронеровностей. В работах [9, 10] фреттинг описан как процесс колебательных микродвижений (в диапазоне $\sim(2-100)$ мкм) двух контактирующих поверхностей. Минимальная амплитуда, при которой наблюдается процесс, может не превышать 100 мкм, а при амплитуде $\sim(200-300)$ мкм

доминирующим становится процесс фреттинг-износа. При серьезных случаях коррозии фреттинг часто связан с усталостным разрушением [1].

Таким образом, фреттинг включает несколько процессов изнашивания/механического повреждения поверхности: абразивное, коррозионное и усталостное. Кроме того, могут иметь место электрохимические процессы, когда между сопряженными поверхностями возникают гальванические пары. Каждый из этих процессов в зависимости от условий может стать доминирующим и определять вид и характер износа [11].

Процесс фреттинга вызывает образование характерных пятен в зоне контакта с наличием вторичных продуктов износа (оксидов и частиц разрушенной поверхности), следов абразивного изнашивания, питтингов и усталостных микротрещин (степень повреждаемости поверхности зависит от ее исходного состояния, параметров и интенсивности процесса) [12]. Следствием фреттинга является снижение долговечности и сокращение времени эксплуатационной надежности конструкции. При повышенных температурах проблема фреттинг-усталости сохраняется.

Фреттинг часто сопровождается химическими процессами на поверхности трения (ФК) [13]. При фреттинг-износе трибологической пары создаются благоприятные условия для протекания химической реакции с кислородом окружающей среды, на поверхности образуется оксидная пленка. Кислород интенсифицирует повреждения при ФК [14]. При этом значительно ухудшается качество поверхности детали (изменяются параметры шероховатости, возможно появление глубоких каверн в результате взаимодействия твердых частиц оксидов с поверхностью сопряжения), наблюдаются разупрочнение структуры поверхностных слоев и ярко выраженные следы коррозии.

Процесс ФК инициируется при контакте сопряженных деталей в условиях агрессивной среды и при циклической нагрузке (вибрации) в коррозионно-активной среде [7]. Процессы истирания сопряженных поверхностей в условиях фреттинга и сопутствующая коррозия вызывают быстрое и разрушительное действие [8–10]. Развитие ФК усиливается при контакте металлов различной природы и с гальванической коррозией [11, 12].

В работах [13–17] показано, что при нагрузках, допускающих проскальзывание, более интенсивно будет протекать процесс ФК; при нагрузках, допускающих незначительное перемещение деталей относительно друг друга, интенсивность изнашивания больше и зависит от твердости поверхности изнашивания [18–21].

Фреттинг-изнашивание и ФК усугубляют напряженно-деформированное состояние деталей, нарушают расчетные параметры зазоров и натягов, увеличивают изнашивание трущихся поверхностей [15]. Наиболее тяжелые последствия процесса фреттинга – усталостное разрушение деталей в прессовых и малоподвижных соединениях, поврежденных ФК [1]. Предел выносливости соединения в этом случае может снижаться в 5 раз [22]. По данным работы [23], на начальных этапах процесса определяющим является повреждающий фактор (фреттинг-фактор), в дальнейшем преобладающими становятся реологический и геометрический факторы.

В случаях, когда контактные (монтажные) давления и вибрация приводят к локальной выработке твердой смазки на поверхности втулки, труба и втулка из одной стали вступают в непосредственный контакт. Создаются благоприятные условия для «прихватаывания» и появления очагов ФК [23–25]. Штатная втулка в хомуте с покрытием кремнийорганической смазкой не обеспечивает необходимый межремонтный период трубы в условиях возникновения ФК.

Состояние поверхностного слоя оказывает значительное влияние на эксплуатационные характеристики стали 12X18H10T. При упрочнении пластической деформацией

строение поверхностного слоя, как правило, отличается от основного материала. В процессе обработки поверхности (наклепа) будет формироваться «дефектный» слой с искаженной структурой (в процессе сдвига в зернах металла, искажения кристаллической решетки, изменения формы и размеров зерен, образования текстуры). В наклепанном металле увеличивается количество дислокаций и вакансий, происходит концентрация дислокаций вокруг линий сдвигов, что приводит к изменению свойств металла (повышению твердости и прочности поверхности). В случаях, когда наклеп вызывает формирование напряжений сжатия в поверхностных слоях, повышается предел выносливости стали. Согласно работам [23–25], величина остаточных напряжений и характер эпюр при поверхностном упрочнении зависят от применяемого метода упрочнения, а при механической обработке – от условий и режимов резания. Знак остаточных напряжений зависит от того, какой фактор превалирует – пластическая деформация (силовой фактор) или состояние ползучести (температурный фактор).

Цель работы – поиск оптимальных режимов упрочнения для повышения устойчивости материала трубы к ФК.

Материалы и методы

Приведены результаты испытания образцов труб размером 8×1 мм, выполненных из высоколегированной стали 12X18H10T, после обработки стеклянной дробью и в исходном (шлифованном) состоянии.

Для определения качественных и количественных характеристик, физико-механических свойств рабочих поверхностей, для исследования процессов упрочнения трубопроводов и процессов изнашивания использованы известные методы проведения механических и виброиспытаний, оценки шероховатости, уровня остаточных напряжений и твердости, изучена морфология поверхности труб и покрытий в зоне трения, проведены микро- и рентгеноструктурные исследования на сканирующем электронном микроскопе [26–28].

Режим упрочняющей обработки образцов приведен в работе [29]. Вид поверхности образцов до и после обработки показан на рис. 2.

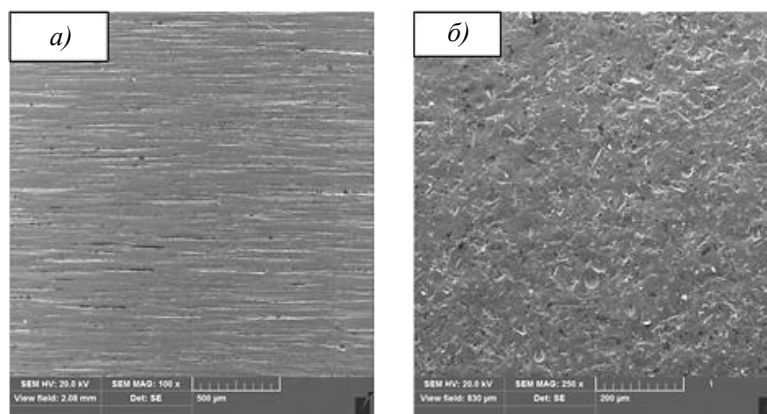


Рис. 2. Поверхности образцов в шлифованном состоянии без дополнительной обработки (а) и после гидродробеструйного упрочнения стеклянной дробью (б)

Поверхностное упрочнение стеклянной дробью не повлияло на предел прочности при растяжении и относительное удлинение образцов (в сравнении с исходным состоянием). Механические свойства всех испытанных образцов соответствуют требованиям стандарта на материал.

Усталостные испытания выполнены на вибродинамическом стенде при изгибных колебаниях по симметричному циклу напряжений с частотой основного тона на базе $20 \cdot 10^6$ циклов с консольным зажатием образца в замок с одного конца. Уровень переменных напряжений задавали и контролировали по двум тензорезисторам и амплитуде перемещения конца образца.

Детальное описание методики испытаний и основы выбора методов изложены в работах [30–32].

Для оптимизации режимов упрочнения стали использован метод линейной регрессии – наиболее распространенный тип регрессионного анализа. Он направлен на установление линейной зависимости между двумя переменными. Обычный метод наименьших квадратов используется для вычисления линейной зависимости, которая минимизирует разницу во второй степени между наблюдаемыми точками данных и прогнозируемыми значениями. Это позволяет оценить ожидаемое значение зависимой переменной, учитывая конкретные значения независимых переменных. Другие формы регрессии используют методы для оценки параметров и ожиданий в более сложных моделях. Регрессионный анализ позволяет, во-первых, прогнозировать и проводить прогностическое моделирование. Во-вторых, регрессионный анализ можно использовать для выявления причинно-следственных связей между переменными.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Результаты механических испытаний образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты исследования усталостной долговечности образцов труб из стали 12X18H10T с различной обработкой поверхности

Показатель	Значения показателей для образца					
	шлифованного				упрочненного гидродробеструйной обработкой	
	1-1.1	1-1.2	1-2.1	1-2.2	2-1.1	2-1.2
Максимальная шероховатость R_a , мкм	1,48	1,48	0,65	0,65	1,17	1,17
Твердость, МПа: HV _{0,010} (на расстоянии 0,01 мм от края образца) HV _{0,025} (на расстоянии 0,02 мм от края образца)	3020 2314	3020 2314	3060 2824	3060 2824	4119 3393	4119 3393
Глубина измененного (упрочненного) слоя, мкм	40,0	40,0	60,0	60,0	80,0	80,0
Сжимающие остаточные напряжения по методу Давиденкова, МПа: средние максимальные	140 219	140 209	209 477	209 198	243 294	243 269
Сжимающие остаточные напряжения XSTRESS, МПа: средние максимальные	162,75 188,50	162,75 188,50	363,575 371,70	363,575 371,10	481,925 493,00	481,925 487,80
Количество наработанных циклов $N \cdot 10^{-6}$ (при напряжении 235 МПа в условиях фреттинг-коррозии)	3,432	1,84	0,375	0,351	8,265	20

Усталостные испытания образцов труб в условиях, исключающих фреттинг (с использованием изолирующей прокладки между трубой и замком), показали, что образцы, упрочненные стеклянной дробью, и со шлифованной наружной поверхностью выдержали без разрушения максимальное напряжение 255 и 177 МПа соответственно. При этом виде испытания очаговые зоны развития трещин на шлифованных образцах совпадали с отдельными кольцевыми рисками на поверхности (рис. 3).

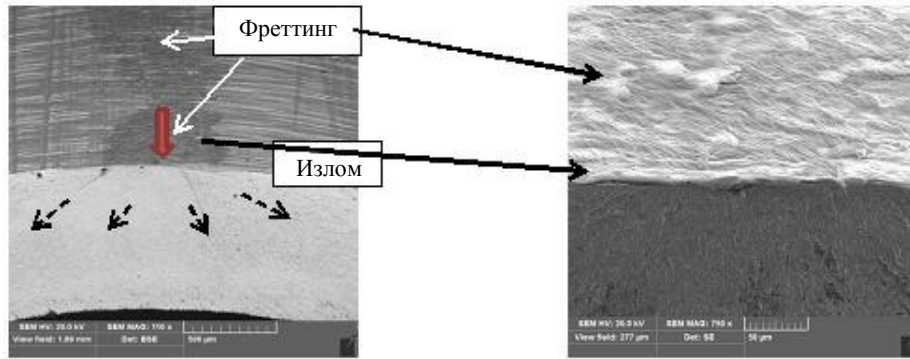


Рис. 3. Вид усталостной трещины по месту участка фреттинг-коррозии на поверхности трубы со шлифованной наружной поверхностью. Трещина образовалась в процессе усталостных испытаний в условиях возникновения фреттинга

При испытании в условиях возникновения фреттинга (без использования изолирующей прокладки между трубой и замком) и одинаково заданном напряжении 235 МПа упрочненный образец наработал $8,265 \cdot 10^6$ циклов до разрушения, что в 2,4 раза больше по сравнению с образцом в шлифованном состоянии ($3,432 \cdot 10^6$ циклов). Очагами зарождения усталостных трещин при испытании образцов в условиях фреттинга (без изолирующей прокладки) как в упрочненном, так и в исходном (шлифованном) состояниях являлись участки фреттинг-коррозии.

На основании полученных результатов методом наименьших квадратов построена математическая модель, выраженная уравнением

$$N = -39,4226 + 0,046HV + 3,6475h - 0,4633\sigma_{ост} - 19,3456R_a,$$

где N – количество циклов до разрушения; HV – твердость материала на расстоянии 0,01 мм от края образца, МПа; h – глубина измененного слоя, мкм; $\sigma_{ост}$ – среднее значение сжимающих остаточных напряжений по четырем образцам, МПа; R_a – максимальное значение параметра шероховатости R_a , мкм.

Коэффициент детерминации модели R^2 составляет 0,997, что свидетельствует о хорошей сходимости.

Показатель твердости и величины средних сжимающих напряжений на поверхности трубы коррелируют друг с другом так же, как и с глубиной измененного (наклепанного) слоя. Сжимающие напряжения можно убрать с помощью термообработки, а шероховатость – шлифовкой и полировкой поверхности, поэтому при фиксированных значениях глубины поврежденного слоя и твердости можно построить график зависимости изменения количества циклов до разрушения от средних сжимающих напряжений 400 МПа и шероховатости поверхности 1 мкм.

Из рис. 4 видно, что количество наработанных циклов при напряжении 235 МПа в условиях ФК увеличивается при повышении твердости поверхности и глубины измененного слоя, а также при уменьшении показателей средних сжимающих напряжений на поверхности стали и ее шероховатости.

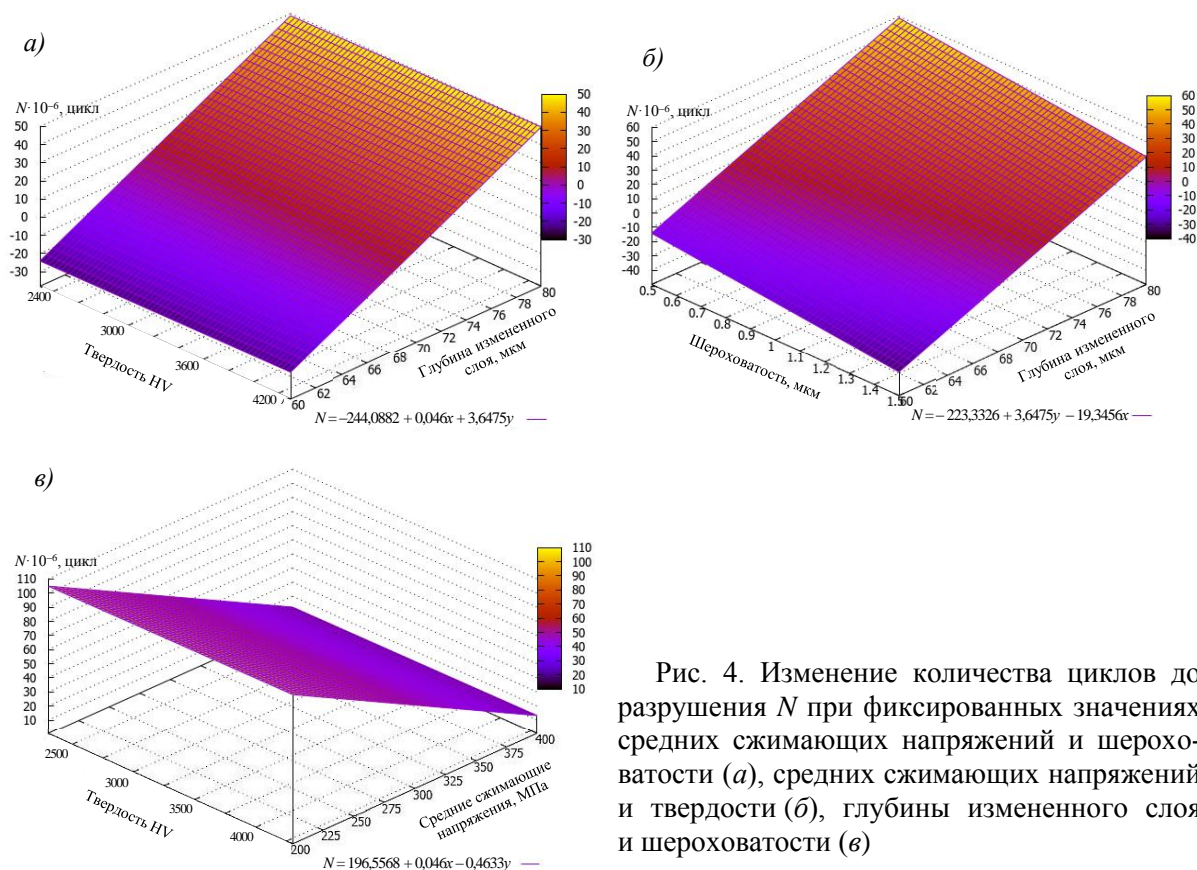


Рис. 4. Изменение количества циклов до разрушения N при фиксированных значениях средних сжимающих напряжений и шероховатости (а), средних сжимающих напряжений и твердости (б), глубины измененного слоя и шероховатости (в)

Проведен поиск оптимальных параметров труб из стали 12Х18Н10Т в условиях ФК. Результаты расчетов приведены в табл. 2. При твердости $HV_{0,025}$ (на расстоянии 0,02 мм от края образца), равной 2510 МПа, глубине измененного слоя >44 мкм, сжимающих остаточных напряжениях $XSTRESS >208,5$ МПа и шероховатости $<1,18$ мкм достигается максимальная устойчивость к ФК поверхности труб из нержавеющей аустенитной стали.

Таблица 2

Результаты математического моделирования процесса упрочнения поверхности стали 12Х18Н10Т

Твердость $HV_{0,025}$, МПа	Глубина измененного слоя h , мкм	Средние сжимающие остаточные напряжения $\sigma_{ост}$, МПа	Максимальное значение параметра шероховатости R_a , мкм	Количество наработанных циклов $N \cdot 10^{-6}$ (при напряжении 235 МПа в условиях фреттинг-коррозии)
Расчетные значения				
2314	40,0	188,5	0,9	2,7
2824	60,0	371,1	0,4	0,3
3393	80,0	487,8	0,8	12,5
Экстраполированные значения				
2314	40	188,5	1,20	-2,96017
2412	42	198,5	1,19	-0,057714
2510	44	208,5	1,18	2,844742

Заключения

Упрочняющая обработка поверхности труб из аустенитной нержавеющей стали стеклянной дробью по заданному режиму приводит к образованию поверхностного упрочненного слоя, обладающего повышенным уровнем сжимающих остаточных напряжений относительно исходного (шлифованного) состояния. Кроме того, упрочняющая обработка образцов устраняет кольцевую ристочность на поверхности шлифованных труб и нивелирует отрицательное действие отдельных глубоких ристок, являющихся очагами развития усталостных трещин.

Определены оптимальные параметры поверхности труб, в частности максимальная устойчивость к ФК достигается при твердости $HV_{0,025}$ (на расстоянии 0,02 мм от края образца), равной 2510 МПа, глубине измененного слоя >44 мкм, средних сжимающих остаточных напряжениях $XSTRESS >208,5$ МПа и шероховатости <1,18 мкм.

Список источников

1. Mystkowska J., Lysik D., Klekotka M. Effect off Saliva and Mucin-Based Saliva Substitutes on Fretting Processes of 316 Austenitic Stainless Steel // *Metals*. 2019. Vol. 9. P. 178.
2. Петухов А.Н. Фреттинг-коррозия и фреттинг-усталость в малоподвижных соединениях // *Вестник СГАУ им. академика С.П. Королева*. 2006. № 2-1 (10). С. 115–120.
3. Мубояджян С.А., Коннова В.И., Горлов Д.С., Александров Д.А. Исследование фреттинг-стойкости стали ЭП866Ш // *Труды ВИАМ*. 2015. № 7. С. 3–7. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-1-1.
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // *Вестник РАН*. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
5. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
6. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. материалов; 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
7. Максаров В.В., Красный В.А. Механизмы трения тонкослойных покрытий в условиях фреттинг-коррозии // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2015. № 3 (226). С. 111–120.
8. Любимов Р.В. Прогнозирование и технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей ГТД, работающих в условиях фреттинг-коррозии: дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, 2000. 202 с.
9. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов. М.: Наука, 2015. 484 с.
10. Островский М.С. Фреттинг как причина снижения надежности горных машин // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011. № S3. С. 315–331.
11. Хаинг Мин, Петухов А.Н., Павлов Ю.И. Обеспечение несущей способности замковых соединений лопаток компрессора авиадвигателя при действии фреттинг-коррозии // *Авиационная промышленность*. 2012. № 1. С. 12.
12. Иванова В.С., Гуревич С.Е., Копьев И.М. и др. Усталость и хрупкость металлических материалов. М.: Наука, 1968. 219 с.
13. Асланян И.Р., Семенов В.И., Шустер Л.Ш. Определение факторов, существенно влияющих на фреттинг-изнашивание электролитических NiP покрытий // *Вестник УГАТУ*. 2012. Т. 16. № 1 (46). С. 57–61.
14. Асланян И.Р., Селис Ж.П., Шустер Л.Ш. Влияние добавок карбида кремния SiC на изнашивание электролитических NiP покрытий // *Трение и износ*. 2010. Т. 31. № 5. С. 353–361.
15. Загорских О.А., Лаптев А.Б. Особенности фреттинг-коррозии нержавеющей аустенитных сталей (обзор) // *Актуальные проблемы защиты от коррозии нефтегазового оборудования и трубопроводов (КОРРОЗИЯ–2023): сб. материалов I Междунар. науч.-техн. конф. (15 мая 2023 г., г. Уфа)*. Уфа, 2023. С. 40–42.

16. Аслаян И.Р., Шустер Л.Ш. Изнашивание электролитических NiP покрытий при фреттинге // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 3. С. 38–43. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-38-43.
17. Аслаян И.Р. Повышение эффективности применения износостойких электролитических покрытий: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Уфа, 2014. 39 с.
18. Аслаян И.Р., Криони Н.К., Шустер Л.Ш. Трибологические характеристики электролитических покрытий в различных условиях трения // *Вестник УГАТУ*. 2013. Т. 17. № 8 (61). С. 24–28.
19. Докшанин С.Г. Влияние смазочных композиций с ультрадисперсными добавками на фреттинг-усталостные процессы // *Вестник СИБГАУ*. 2014. № 3 (55) С. 198–201.
20. Шевеля В.В., Олександренко В.П. Реологические аспекты влияния фреттинга на коррозионное растрескивание стали // *Вестник двигателестроения*. 2006. № 1. С. 95–100.
21. Забиров Ф.Ш., Мансуров Р.Р. О негативном влиянии фреттинг-коррозии в резинометаллической опоре шпинделя турбобура // *Аллея науки*. 2017. Т. 2. № 9. С. 412–414.
22. Петухов А.Н. Фреттинг и фреттинг-усталость конструкционных материалов и деталей // *Авиационная промышленность*. 2014. № 4. С. 45–50.
23. Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Епишин А.И., Карашаев М.М., Елютин Е.С. Монокристаллы жаропрочных никелевых сплавов, легированных рением и рутением (обзор). Часть 1 // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). С. 30–50. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
24. Погоньшев В.А., Тищенко С.В. Метод повышения фреттингостойкости деталей машин путем улучшения их демпфирующих свойств // *Современные тенденции в науке, технике, образовании: сб. науч. тр. по материалам III Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. (31 марта 2018 г., г. Смоленск)*. Смоленск: НОВАЛЕНСО, 2018. Ч. 2. С. 77–80.
25. Смыслов А.М., Селиванов К.С. Разработка и исследование технологических методов повышения фреттинг стойкости рабочих лопаток из титановых сплавов // *Вестник УГАТУ*. 2007. Т. 9. № 1 (19). С. 77–83.
26. Фридман З.Г., Вейцман М.Г. Влияние механико-термической обработки на циклическую прочность листов из стали 1X18H9 // *Усталость металлов и сплавов: сб. материалов V совещания по усталости металлов*. М.: Наука, 1971. С. 123.
27. Fouvry S., Kapsa P., Vincent L. Quantification of fretting damage // *Wear*. 1996. Vol. 200. P. 186–205. DOI: 10.1016/j.wear.2009.09.012.
28. Loto R.T. Assessment of pitting corrosion of austenitic stainless steel type 304 in an acid-chloride environment // *Journal of Materials and Environmental Sciences*. 2013. Vol. 4 (4). P. 448–459.
29. Dabrowski J.R., Klekotka M., Sidun J. Fretting and fretting corrosion of 316L implantation steel in the oral cavity environment // *Eksplatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*. 2014. Vol. 16. P. 441–446. DOI: 10.3390/ma13071561.
30. Лаптев А.Б., Закирова Л.И., Загорских О.А., Павлов М.Р. Методы исследования процессов коррозионно-механического разрушения и наводороживания металлов (обзор). Часть 1. Исследование коррозионно-механического разрушения сталей // *Труды ВИАМ*. 2022. № 4 (110). С. 118–130. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-118-130.
31. Лаптев А.Б., Закирова Л.И., Загорских О.А., Павлов М.Р., Горбовец М.А. Методы исследования процессов коррозионно-механического разрушения и наводороживания металлов (обзор). Часть 2. Образование пассивных пленок и сероводородное растрескивание сталей // *Труды ВИАМ*. 2022. № 5 (111). С. 138–146. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-138-146.
32. Загорских О.А., Лаптев А.Б. Предотвращение фреттинг-коррозии легированной стали аустенитного класса формированием упрочненного слоя на поверхности // *Вестник ПНИПУ. Сер.: Машиностроение, материаловедение*. 2024. Т. 26. № 4. С. 5–18. DOI: 10.15593/2224-9877/2024.4.01.

References

1. Mystkowska J., Lysik D., Klekotka M. Effect off Saliva and Mucin-Based Saliva Substitutes on Fretting Processes of 316 Austenitic Stainless Steel. *Metals*, 2019, vol. 9, p. 178.
2. Petukhov A.N. Fretting corrosion and fretting fatigue in low-mobility joints. *Vestnik SGAU im. akademika S.P. Koroleva*, 2006, no. 2-1 (10), pp. 115–120.
3. Muboyadzhyan S.A., Konnova V.I., Gorlov D.S., Alexandrov D.A. The study of steel EP866Sh fretting resistance. *Trudy VIAM*, 2015, no. 7, pp. 3–7. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-1-1.
4. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik RAN*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
5. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
6. Kablov E.N. *Trends and Guidelines for Innovative Development of Russia: Collection of Scientific and Information Materials*; 3rd ed., rev. and enl. Moscow: VIAM, 2015, 720 p.
7. Maksarov V.V., Krasnyy V.A. Friction Mechanisms of Thin-Film Coatings under Fretting Corrosion Conditions. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SpbGPU*, 2015, no. 3 (226). pp. 111–120.
8. Lyubimov R.V. *Forecasting and Technological Support of Performance Properties of GTE Parts Operating under Fretting Corrosion Conditions*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Rybinsk, 2000, 202 p.
9. Terentyev V.F., Korableva S.A. *Metal Fatigue*. Moscow: Nauka, 2015, 484 p.
10. Ostrovsky M.S. Fretting as a Cause of Reduced Reliability of Mining Machines. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2011, no. S3, pp. 315–331.
11. Khaing Min, Petukhov A.N., Pavlov Yu.I. Ensuring the Load-Bearing Capacity of Lock Joints of Aircraft Engine Compressor Blades under the Effect of Fretting Corrosion. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2012, no. 1, p. 12.
12. Ivanova V.S., Gurevich S.E., Kopyev I.M. et al. *Fatigue and Brittleness of Metallic Materials*. Moscow: Nauka, 1968, 219 p.
13. Aslanyan I.R., Semenov V.I., Shuster L.Sh. Determination of factors significantly influencing fretting wear of electrolytic NiP coatings. *Vestnik UGATU*, 2012, vol. 16, no. 1 (46), pp. 57–61.
14. Aslanyan I.R., Selis Zh.P., Shuster L.Sh. Effect of silicon carbide SiC additives on wear of electrolytic NiP coatings. *Trenie i iznos*, 2010, vol. 31, no. 5, pp. 353–361.
15. Zagorskikh O.A., Laptev A.B. Features of fretting corrosion of stainless austenitic steels (review). *Actual problems of corrosion protection of oil and gas equipment and pipelines (CORROSION–2023): collection of materials of the I Int. scientific and technical conf.* Ufa, 2023, pp. 40–42.
16. Aslanian I.R., Schuster L.Sh. Wear of electrolytic NiP coatings at fretting. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 3 (36), pp. 38–43. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-38-43.
17. Aslanyan I.R. *Improving the efficiency of wear-resistant electrolytic coatings*: thesis abstract, Dr. Sc. (Tech.). Ufa, 2014, 39 p.
18. Aslanyan I.R., Krioni N.K., Shuster L.Sh. Tribological characteristics of electrolytic coatings under various friction conditions. *Vestnik UGATU*, 2013, vol. 17, no. 8 (61), pp. 24–28.
19. Dokshanin S.G. Influence of lubricating compositions with ultradispersed additives on fretting fatigue processes. *Vestnik SIBGAU*, 2014, no. 3 (55), pp. 198–201.
20. Shevelya V.V., Oleksandrenko V.P. Rheological aspects of the influence of fretting on stress-corrosion cracking of steel. *Vestnik dvigatelestroyeniya*, 2006, no. 1, pp. 95–100.
21. Zabiroy F.Sh., Mansurov R.R. On the Negative Impact of Fretting Corrosion in a Rubber-Metal Bearing of a Turbodrill Spindle. *Alleya nauki*, 2017, vol. 2, no. 9, pp. 412–414.
22. Petukhov A.N. Fretting and Fretting Fatigue of Structural Materials and Components. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2014, no. 4, pp. 5–50.
23. Svetlov I.L., Petrushin N.V., Epishin A.I., Karashaev M.M., Elyutin E.S. Single crystals of nickel-based superalloys alloyed with rhenium and ruthenium (review). Part 1. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), pp. 30–50. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 07, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.

24. Pogonyshev V.A., Tishchenko S.V. Method for Increasing Fretting Resistance of Machine Parts by Improving Their Damping Properties. *Current Trends in Science, Technology, and Education: Coll. of Scientific Papers Based on the Proceedings of the III Int. Res. and Pract. Conf.:* in 2 Parts (March 31, 2018, Smolensk). Smolensk: NOVALENZO, 2018, part 2, pp. 77–80.
25. Smyslov A.M., Selivanov K.S. Development and Research of Technological Methods for Improving Fretting Resistance of Titanium Alloy Working Blades. *Vestnik UGATU*, 2007, vol. 9, no. 1 (19), pp. 77–83.
26. Fridman Z.G., Veitsman M.G. The influence of mechanical and thermal treatment on the cyclic strength of sheets of 1X18N9 steel. *Fatigue of metals and alloys: coll. of materials of the 5th Conference on metal fatigue*. Moscow: Nauka, 1971, p. 123.
27. Fouvry S., Kapsa P., Vincent L. Quantification of fretting damage. *Wear*, 1996, vol. 200, pp. 186–205. DOI: 10.1016/j.wear.2009.09.012.
28. Loto R.T. Assessment of pitting corrosion of austenitic stainless steel type 304 in an acid-chloride environment. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 2013, vol. 4 (4), pp. 448–459.
29. Dabrowski J.R., Klekotka M., Sidun J. Fretting and fretting corrosion of 316L implantation steel in the oral cavity environment. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 2014, vol. 16, pp. 441–446. DOI: 10.3390/ma13071561.
30. Laptev A.B., Zakirova L.I., Zagorskikh O.A., Pavlov M.R. Methods of investigation of the processes of corrosion-mechanical destruction and hydrogenation of metals (review). Part 1. Investigation of corrosion-mechanical destruction of steels. *Trudy VIAM*, 2022, no. 4 (110), pp. 118–130. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-118-130.
31. Laptev A.B., Zakirova L.I., Zagorskikh O.A., Pavlov M.R., Gorbovets M.A. Methods of investigation of the processes of corrosion-mechanical destruction and hydrogenation of metals (review). Part 2. Formation of passive films and hydrogen sulfide cracking of steels. *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), pp. 138–146. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-138-146.
32. Zagorskikh O.A., Laptev A.B. Prevention of fretting corrosion of austenitic alloy steel by forming a hardened layer on the surface. *Bulletin PNIPU. Ser.: Mechanical Engineering, Materials Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 5–18. DOI: 10.15593/2224-9877/2024.4.01.

Информация об авторах

Лаптев Анатолий Борисович, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Загорских Ольга Анатольевна, заместитель главного металлурга, заместитель главного инженера, АО «ОДК-Пермские моторы», pmz@pmz.ru

Федоров Александр Сергеевич, инженер, ФГАОУ ВО «СПбПУ», office@spbstu.ru

Голубев Иван Андреевич, руководитель направления, к.т.н., ФГАОУ ВО «СПбПУ», office@spbstu.ru

Information about the authors

Anatoliy B. Laptev, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Olga A. Zagorskikh, Deputy Chief Metallurgist, Deputy Chief Engineer, UEC-Perm Engines, pmz@pmz.ru

Alexander S. Fedorov, Engineer, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, office@spbstu.ru

Ivan A. Golubev, Head of Department, Candidate of Sciences (Tech.), Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, office@spbstu.ru

Статья поступила в редакцию 26.03.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 03.04.2025.

The article was submitted 26.03.2025; approved and accepted for publication after reviewing 03.04.2025.