



**Уральский
федеральный
университет**

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ)

ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, тел.: +7 (343) 375-45-07

контакт-центр: +7 (343) 375-44-44, 8-800-100-50-44 (звонок бесплатный)

e-mail: rector@urfu.ru, www.urfu.ru

ОКПО 02069208, ОГРН 1026604939855, ИНН/КПП 6660003190/667001001

26 ФЕВ 2024

01.09 - 07/11/24

№ _____

На № _____ от _____



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке

А.В.Германенко

2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГНИЗАЦИИ

на диссертационную работу

Полянского Александра Михайловича

**«МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ РАЗРУШЕНИЯ
ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ЖРД БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ В ПРОИЗВОДСТВЕ И
ЭКСПЛУАТАЦИИ»**, представленную на соискание ученой степени доктора
технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая
обработка металлов и сплавов

Диссертационная работа Полянского А.М. представленная в виде рукописного труда, состоит из введения, восьми глав, основных выводов, списка использованной литературы и трех приложений. Основной текст изложен на 435 страницах, содержит 79 таблиц, 327 рисунков, библиографический список из 173 литературных источников.

ХАРАКТЕРИСТИКА АКТУАЛЬНОСТИ РАБОТЫ.

Актуальность обусловлена необходимостью предотвращения преждевременного разрушения деталей и узлов ЖРД большой мощности в процессе производства и эксплуатации, сопутствующего повышения их качества, надежности и ресурса узлов, выхода годного и существенного снижения затрат на их изготовление, стоимости изготовления. Особенно остро эта проблема встает при разработке многоразовых двигателей, например, для универсальной ракеты нового поколения «Ангара». В связи с

этим актуальность исследований Полянского А.М., направленных на металловедческое решение указанных проблем разрушений деталей и узлов ЖРД, не вызывает сомнений.

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ И СОДЕРЖАНИЯ РАБОТЫ.

Во введении обсуждается актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, новизна и научно-техническая значимость работы, достоверность и апробация полученных результатов, а также основные положения, выносимые на защиту, описан личный вклад соискателя и кратко изложено содержание работы.

В первой главе содержится описание методик, разработанных для идентификации характера высокотемпературных разрушений, оценки качества паяных соединений и определения средней толщины серебряного покрытия на оребренных бронзовых стенках узлов, предназначенных для контактно-реактивной пайки. Методика, разработанная для идентификации характера высокотемпературных разрушений, включает в себя фрактографические исследования изломов и метод датированного окисления, заключающийся в определении концентрации кислорода на поверхности разрушения в зависимости от длины трещины. Комплексная методика по оценке качества паяных соединений, включающая в себя определение разрывной прочности швов, фрактографический анализ поверхностей образовавшихся изломов и дополнительное металлографическое исследование поперечных сечений паяных швов позволяет объективно оценивать качество швов и определять возможные причины снижения их качества. Разработанная методика неразрушающего контроля средней толщины гальванического покрытия серебра на оребренных бронзовых стенках методом рентгенофлуоресцентного анализа - среднюю толщину серебряного покрытия элементов оребрения.

Во второй главе представлены результаты исследования эксплуатационных разрушений лопаток соплового аппарата (СА) и структурных превращений в сплаве ЭК-61 (ХН58МБЮД), происходящих на огневых испытаниях (ОИ) двигателей. Проведен анализ литературных данных по структуре и прогнозировании ее изменений в жаропрочных никелевых сплавах типа ЭК-61 и их характеристикам жаропрочности и сопротивления усталости. Проанализированы особенности технологии формирования проточной части СА и параметры горячего газа, воздействующего на лопатки при ОИ двигателя. Выявлены закономерности разрушения сплава ЭК-61: получены кинетические диаграммы усталостного разрушения (КДУР) при циклическом нагружении с коэффициентами асимметрии цикла R-0.1, R-0.5 и R-0.8 при температуре 650 °С и карты электронных микрофрактограмм последовательной смены рельефов поверхностей разрушения при увеличении размаха коэффициентов интенсивности напряжений (ΔK). Представлены также результаты исследования структурной нестабильности

сплава ЭК-61 в условиях высокотемпературного циклического деформирования. Обнаружен неизвестный ранее механизм усталостного разрушения в выходных кромках лопаток СА, заключающийся во встречном росте поверхностных усталостных трещин со стороны корытца и спинки, которые соединяясь, образуют магистральную трещину. Проведена оценка остаточного ресурса лопатки СА двигателя РД180 с трещиной в выходной кромке.

В третьей главе проанализированы особенности технологии формирования проточной части рабочего колеса турбины (РКТ), материалом которого является жаропрочный сплав на никелевой основе ЭП741 НП, полученный методом горячего изостатического прессования (ГИП). Оценено влияние технологических нагревов (ТН), используемых в технологии изготовления РКТ, на длительную прочность сплава ЭП 741 НП.

Исследования микро и тонкой структуры материала РКТ сплава ЭП 741 НП позволили выявить основные дефекты в заготовках РКТ (поры и границы неспеченных гранул. Получены усталостные характеристики сплава ЭП741 НП: кинетические диаграммы усталостного разрушения (КДУР) при циклическом нагружении с коэффициентами асимметрии цикла R-0.1, R-0.5 и R-0.8 при температуре 650 °С и карты электронных микрофрактограмм последовательной смены рельефов поверхностей разрушения при увеличении размаха коэффициентов интенсивности напряжений (ΔK). Классифицированы типы усталостных трещин в лопатках РКТ (зарождающиеся на поверхности радиуса перехода выходной кромки в бандаж (1-й тип), на поверхности радиуса перехода выходной кромки в ступицу (2-й тип) и в кромке бандажа РКТ со стороны спинок лопаток (3-й тип) и механизмы их образования.

Проанализированы характер и причин образования массовых и единичных растрескиваний в лопатках РКТ и результаты исследования влияния пристеночного холодного кислорода газогенератора на «аномальный» рост трещин в лопатках РКТ двигателя РД180, проявляющийся в более высокой скорости роста поверхностных трещин по спинке лопатки.

В четвертой главе представлены результаты исследования характера и причин образования технологических дефектов – термических трещин в паяных соединениях (внутренняя стенка БрХ0.8 + наружная стенка ВНС-16) средней части камеры сгорания (КС). Выявлены природа образования вспучиваний охлаждаемых внутренних стенок КС (при ОИ), термоударного и кавитационного механизмов образования проплавов теплозащитного покрытия (ТЗП) на участках поверхности внутренней стенки КС в области критического сечения.

В пятой главе 5 рассмотрены основные типы разрушений трубопроводов ЖРД. Представлены результаты усталостных разрушений трубопроводов, происходящих под воздействием вибрационных нагрузок по основному

материалу трубы на границе валика сварного шва, соединяющего штуцер с трубой. Идентифицированы механизмы зарождения и роста трещин у трубопроводов в изгибах (на их средней линии), происходящих на внутренних поверхностях трубы под воздействием пульсаций внутреннего давления и на внешних поверхностях трубы путем замедленного разрушения.

В главе 6 проанализированы механизмы гидроэрозионного (ударно – капельного, кавитационного) и фреттинг – износа, наблюдаемые в узлах ЖРД на ОИ двигателей. Определен механизм разрушения поверхности проточной части турбины (поверхности лопаток СА, РКТ и лабиринтного уплотнения) при ударно – капельном воздействии закритического холодного кислорода, повреждений внутренней поверхности у штуцеров трубопроводов и у лопаток шнеков насосов горючего под воздействием гидродинамической кавитации, а также на внутренних поверхностях бронзовых стенок в межреберном пространстве тракта охлаждения камер сгорания под воздействием акустической кавитации. С использованием систематических фрактографических исследований рабочих поверхностей деталей узлов ЖРД (на ОИ двигателей), определены причины их фреттинг-износа и факторы, контролирующие разрушение поверхностей контртел.

В седьмой главе представлены результаты исследований: характера и причин технологических разрушений узлов ЖРД из жаропрочных никелевых сплавов, происходящих при капиллярной и контактно-реактивной пайках медносеребряными припоями; механизма образования холодных трещин в литых патрубках из сплава ВТ-5Л; характера и причин замедленного разрушения гаек (сплав АВ), стягивающих два корпуса клапана продувки магистралей азота; технологические рекомендации по предотвращению разрушений гаек клапана; причин сквозных разрушений слоев многослойного сильфона компенсатора (сталь 12Х18Н10Т) магистрали горючего ЖРД после проведения ускоренных климатических испытаний (УКИ). Их понимание обеспечило поиск технологических решений, направленных на снижение риска преждевременного разрушения.

В восьмой главе представлены и обсуждены результаты исследований: влияния микроструктуры и фазового состава на технологическое охрупчивание жаропрочного медноникелевого сплава (по паспорту ПЗ1 – 39 – 73 жаропрочный медный сплав №273); влияния термообработок на снижение ударной вязкости КСВ-196 стали 03Х12Н10МТР-ВД (ВНС-25) и определены причины и механизм вязко – хрупкого перехода: технологического охрупчивания сплава ЖСЗ–ДК (ХН59МВТКЮЛ) и его связи с использованной технологией литья.

Каждую главу завершают обстоятельные выводы, свертка которых содержится в автореферате. В целом текст диссертации выстроен логично,

его отличает строгий стиль изложения, качественные иллюстрации. Автореферат достоверно и полно отражает содержание работы.

Основные научные положения диссертационной работы Полянского А.М. выводы, рекомендации являются достоверными и обоснованными. Это обеспечивается:

- комплексным подходом к решению поставленных задач;
- использованием современного оборудования и методов исследования;
- большим объёмом выполненных экспериментов по разработанным методикам и воспроизводимостью полученных результатов;
- согласием полученных результатов с имеющимися в литературе представлениями о механизмах деформации и разрушения;
- положительной апробацией результатов исследований на 6 российских и международных научных конференциях;
- публикацией основных выводов и положений исследования в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК (39 статей), а также индексируемых в базах данных Scopus (7 публикаций) и 4 патента (все они достаточно полно отражают содержание диссертации).

Личное участие соискателя в получении результатов исследований, изложенных в диссертации, выполненных самим соискателем или под его непосредственным руководством, выражаются в том, что он, непосредственно участвовал в проведении исследований характера и механизмов технологических и эксплуатационных разрушений деталей и узлов ЖРД и вырабатывал конструктивно – технологические мероприятия, позволяющие предотвращать преждевременное разрушение деталей и узлов ЖРД, в т.ч. в жестких условиях их эксплуатации. Полученные результаты исследований оформлял в виде научных публикаций, докладов и патентов. Основные положения и выводы диссертационной работы сформулированы автором.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- Разработаны методы: идентификации механизмов высокотемпературного разрушения методом датированного окисления, основанного на определении концентрации кислорода по длине трещины; оценки качества паяных соединений, основанного на разрушении паяных швов; определения средней толщины гальванического серебряного покрытия на оребренных паяемых стенках методом рентгенофлуоресцентного анализа, которые наряду с принятыми методами оценки прочности, вязкости разрушения, сопротивления усталостному разрушению; средствами и методами структурного и фрактографического анализа обеспечили комплексный подход к определению механизмов разрушения и износа, выявлению структурных, металлургических и эксплуатационных факторов их определяющих.

- Обнаружено, что в выходных кромках лопаток СА (сплав ЭК61) и РКТ (сплав ЭП741 НП) схожие механизмы роста усталостных трещин, заключающиеся во встречном росте поверхностных трещин со стороны корытца и спинки, которые последовательно соединяясь, образуют магистральную трещину. Образование в вершинах поверхностных трещин под воздействием термоударных нагрузок (на запуске и останове двигателя, при многократном применении) зон пластической деформации с остаточными напряжениями сжатия приводит к смещению плоскости каждой следующей трещины по отношению к предыдущей, что значительно снижает среднюю скорость их роста.

В отличие от СА, в лопатках РКТ наблюдается более высокая скорость роста поверхностных трещин по их спинке (по сравнению с корытцем). Это связано с дополнительной циклической нагрузкой, соответствующей частоте вращения вала ТНА, при термоциклировании спинки лопатки потоком низкотемпературного пристеночного слоя кислорода газогенератора.

- Установлено, что высокотемпературное циклическое деформирование сплава ЭК-61 значительно увеличивает скорость образования δ - фазы по сравнению с последней при старении и снижает предел выносливости сплава.

- При технологических нагревах РКТ в результате роста зерна, растворения частиц γ - фазы и декорирования границ зёрен карбидами MeC на основе ниобия, способствующими легкому порообразованию при зернограницном проскальзывании, происходит снижение длительной прочности сплава ЭП741НП.

- Установлено, что причина массового растрескивания лопаток РКТ обусловлена их высоким наводороживанием в результате индивидуальных особенностей технологических процессов изготовления РКТ (травление защитного покрытия) и растрескиванию при запуске и останове двигателя, в области температур близких к комнатной (на нестационарных режимах работы). Причина единичного растрескивания лопаток РКТ в выходных кромках лопаток – наличие микроконцентраторов напряжений (границы не спеченных гранул, поры).

- Установлен механизм образования термических трещин в паяных соединениях на краях канавки коллектора средней части КС при охлаждении сборки после пайки, заключающийся в возникновении касательных напряжений несоответствия между сопрягаемыми стенками из-за разницы значений их коэффициентов линейного термического расширения.

- Проведено исследование механизма адгезионного образования проплавов теплозащитного покрытия (ТЗП) на поверхности охлаждаемой стенки КС в

области критического сечения, заключающегося в расслоении слоев ТЗП под воздействием термоудара на останове двигателя из-за низкого уровня межслойной адгезии и образование проплава ТЗП на последующем ОИ.

- Установлено, что при кавитационном механизме образования проплавов ТЗП на поверхности охлаждаемой стенки КС в области критического сечения происходит в результате нарушения условий штатного теплоотвода в отдельных каналах охлаждающего тракта на локальных участках стенки из-за образования завесы из пузырьков охладителя, возникающих в результате акустической (ультразвуковой) кавитации, вызываемой высокочастотными акустическими колебаниями в камере сгорания. Образование регулярно расположенных сквозных проплавов ТЗП происходит в результате локального перегрева охлаждаемой стенки КС на участках пучностей стоячей поперечной тангенциальной ультразвуковой волны, имеющей длину, равную расстоянию между проплавами.

- Установлено, что у трубопровода с овальным сечением (разность между большой и малой полуосями овала: $O = (a-b)/2$) в изгибе под воздействием пульсаций внутреннего давления зарождение усталостных трещин происходит на внутренней поверхности трубы в области максимальных растягивающих окружных напряжений на средней линии изгиба; при отсутствии давления в трубопроводе зарождение трещин происходит на внешней поверхности трубы в области максимальных растягивающих окружных напряжений на средней линии изгиба путем замедленного разрушения по механизму водородного охрупчивания.

- Установлено, что гидроэрозионный износ поверхностей проточной части турбины происходит под воздействием капельной фазы закритического криогенного кислорода.

При высоких уровнях вибраций повреждение рабочих поверхностей сопрягаемых деталей узлов ЖРД в трактах с инертной средой происходит по механизму фреттинг-износа, а основными контролирующими износ процессами являются фреттинг – усталость и схватывание (адгезия).

- Определены причины и механизмы разрушения:

- узлов ЖРД из жаропрочных никелевых сплавов путем жидкометаллического охрупчивания при пайке медно - серебряными припоями;
- литых патрубков из сплава ВТ-5Л в результате зарождения первичных трещин при охлаждении под воздействием термических напряжений в результате теплового охрупчивания в интервале температур $\beta \rightarrow (\alpha+\beta)$ перехода (1030-980 °С) и последующего субкритического роста трещин (СРТ) по механизму водородного охрупчивания;

- последовательного роста сквозных трещин в слоях сильфона компенсатора магистрали подвода горючего в результате коррозионного растрескивания слоев и после проникновения конденсата в зазоры между слоями значительного растрыва границ зерен - в результате щелевой коррозии.
- Проведены исследования и определены механизмы технологического охрупчивания:
- жаропрочного медноникелевого сплава (сплав 273), заключающегося в выделении зернограничных пластинчатых выделений η – фазы;
 - коррозионностойкой стали 03X12H10МТР-ВД (ВНС-25) со 100%-ым содержанием мартенсита, упрочненным при старении дисперсными частицами Ni_3Ti в результате вязко – хрупкого перехода;
 - жаропрочного никелевого сплава ЖСЗ-ДК, связанного с присутствием в микроструктуре крупных выделений карбидов TiC , имеющих неблагоприятную морфологию и образовавшихся путем кристаллизации на поверхности карбидов титана, перешедших в расплав из материала скрапа 3-го перепада, который в количестве 50% добавлялся в шихту.

Практическая значимость работы.

Результаты работы нашли свое практическое применение при выявлении причин и механизмов технологических и эксплуатационных разрушений узлов ЖРД и разработке технологических и конструктивных мероприятий по исключению риска преждевременного разрушения и эксплуатации в условиях производства ОАО «НПО Энергомаш» (г. Химки), а также смежных предприятиях отрасли: ПАО «Протон ПМ» (г. Пермь), КБХА и ВМЗ (г. Воронеж), НПО Лавочкина (г. Химки), АО Кузнецов (г. Самара). Соответствующие акты приведены в диссертационной работе.

Замечания по диссертационной работе.

1. Согласно ТУ14-1-2235-77 для стали 03X12H10МТР-ВД (ВНС-25) рекомендованы два режима термической обработки:

режим I – закалка с температуры $(1000 \pm 10)^\circ C$, охлаждение – вода; обработка холодом при температуре $(-70)^\circ C$, выдержка 2 часа, отпуск при температуре $(250 - 500)^\circ C$ – 2 часа;

режим II – закалка с температуры $(750 \pm 10)^\circ C$, охлаждение – воздух или вода; закалка с температуры $(750 \pm 10)^\circ C$, охлаждение – воздух или вода; отпуск при температуре $(500 \pm 10)^\circ C$ – 2 часа, охлаждение воздух.

Пайка узлов из стали ВНС-25 проводится при температуре $1000^\circ C$ с имитацией закалки при охлаждении (глава 8, п. 8.2). Установлено, что после закалки от $1000^\circ C$ в воду и после термообработки по варианту I образцы

стали имеют структуру со 100 % – м содержанием мартенсита. В таком случае операция обработки холодом при температуре – 70 °С является лишней?

2. При анализе причин замедленного разрушения трубопровода магистрали горючего бустерного насоса двигателя из стали 06X15H6MBФБ (ВНС–16), показано, что наличие межзеренного разрушения в изломе, ветвящиеся вторичные трещины и микропоры по границам зерен являются признаками замедленного разрушения по механизму водородного охрупчивания. Однако этому могли способствовать и зернограницные примеси сурьмы, фосфора, олова, или мышьяка.

3. Сплавы, из которых изготавливают узлы турбин ЖРД большой мощности - горячедеформированный ЭК-61(СА) и гранулируемый ЭП741П (рабочее колесо турбины) относятся к разряду достаточно давно используемых жаропрочных материалов, поэтому интерес к ним вполне обоснован. Однако было бы также интересно обсудить перспективы развития материалов данного назначения;

4. Результаты работы представляют собой существенный научный и практический интерес, масштаб которого выходит за пределы диссертации, отсюда пожелание соискателю сделать их более доступными для широкой научной и технической общественности, представив в виде научной монографии.

Общее заключение по диссертационной работе

Сделанные замечания не снижают научной и практической значимости полученных результатов. Диссертация А.М. Полянского выполнена на достаточно высоком экспериментальном уровне, полученные результаты являются новыми и имеют научную и практическую значимость. Достоверность результатов подтверждается их согласованностью с литературными данными. Это позволяет утверждать, что обозначенные в работе цели и задачи исследования достигнуты, а положения, выносимые на защиту, экспериментально доказаны.

Диссертация Полянского Александра Михайловича является законченной научно- квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технологические и технические решения, направленные на предотвращение разрушения деталей и узлов ЖРД большой мощности в производстве и эксплуатации, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие научно-технического потенциала космической отрасли страны.

Диссертационная работа на тему «Материаловедческие решения проблем разрушения деталей и узлов ЖРД большой мощности в производстве и эксплуатации» соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС, а ее автор Полянский Александр Михайлович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1 - Металловедение

и термическая обработка металлов и сплавов по результатам публичной защиты.

Диссертационная работа Полянского А.М. рассмотрена и обсуждена на заседании кафедры термообработки и физики металлов ИНМТ УрФУ 15 февраля 2024 г. протокол №2.

Заведующий кафедрой
профессор, доктор технических наук



А.А.Попов

Адрес организации,
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19
www.urfu.ru
Тел. +73433754574,
E-mail rector@urfu.ru