

На правах рукописи



НЕМЦЕВ ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ РОСТА ТРЕЩИНЫ
УСТАЛОСТИ В ВАКУУМЕ НА РЕСУРС ДИСКОВ ГАЗОТУРБИННЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ**

Специальность 2.5.15.

«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный
руководитель

Марчуков Евгений Ювенальевич, доктор технических наук, профессор, ОКБ им. А.Люльки – филиал ПАО «ОДК-УМПО», генеральный конструктор – директор, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», заведующий кафедрой «Технология производства двигателей летательных аппаратов»

Официальные
оппоненты:

Колодяжный Дмитрий Юрьевич, доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», проректор по научной деятельности

Нескоромный Евгений Вячеславович, кандидат технических наук, федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, доцент кафедры «Авиационные двигатели»

Ведущая
организация

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Защита диссертации состоится 18 декабря 2023 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=176514.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.327.06,

д.т.н., доцент



Краев Вячеслав Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Авиационные газотурбинные двигатели (ГТД) принадлежат к классу особо ответственных машин, так как их отказы в большинстве случаев могут привести не только к экономическим потерям, но и к катастрофическим последствиям. Одновременно с этим проектирование двигателей осуществляется в жестких конкурентных условиях при постоянно возрастающих требованиях к таким параметрам как надежность и ресурс, рассматриваемым наравне с удельным расходом, массой, температурой газа и другими основными параметрами двигателя.

Ресурс ГТД в значительной степени определяется ресурсом его основных деталей (ОД). К таким деталям относятся диски компрессоров и турбин. Обломки, возникшие при разрушении данных деталей в эксплуатации, из-за большой массы и высокой частоты вращения не локализируются в корпусе двигателя и могут привести к аварийным или катастрофическим последствиям.

Наибольшее влияние на ресурсные показатели дисков ГТД оказывает малоцикловая усталость (МЦУ). Данный механизм усталостного разрушения происходит при повторных упругопластических деформациях при многократном нагружении при напряжениях, меньших чем разрушающие напряжения от однократно приложенной нагрузки. В дисках данный механизм возникает при циклическом изменении режимов работы двигателя.

В соответствии с требованиями нормативной документации ресурс ОД авиационных ГТД устанавливается и подтверждается на основе концепции безопасной долговечности (КБД) (до появления трещины МЦУ) и концепции безопасного развития дефекта (КБРД) (рост трещины).

Расчет по КБРД может производиться с использованием разного рода допущений, не учитывающих такие параметры как величина инкубационного периода зарождения трещины, снижения скорости роста внутренних трещин по сравнению с поверхностными и другие. Данные допущения могут привести к консервативному определению ресурсных показателей ОД.

Одним из широко применяемых способов получения заготовок дисков является технология гранульных сплавов. Данная технология обладает такими преимуществами перед технологией получения заготовок методом деформации слитка, как повышенные прочностные свойства и структурная однородность, а также сниженный коэффициент использования материала за счет применения капсульной оснастки, повторяющей форму детали.

К недостаткам технологии гранульных сплавов можно отнести наличие инородных включений, служащих очагами зарождения и развития усталостных

трещин. Данные дефекты могут располагаться на поверхности и внутри материала детали. Существенное влияние на разницу в скоростях роста поверхностных и внутренних трещин оказывает окисление вершины трещины. В поверхностных трещинах окисление происходит за счет доступа окружающей среды (на воздухе), во внутренних только за счет ограниченного влияния примесей материала (в вакууме). При этом скорость роста поверхностных трещин оказывается выше, чем внутренних.

В связи с этим при определении ресурсных показателей дисков необходимо учитывать наличие внутренних дефектов, от которых могут зародиться усталостные трещины, развивающиеся в условиях вакуума.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что практическая и научная задача исследования влияния скорости роста трещины усталости на ресурс дисков газотурбинных двигателей является актуальной.

Степень разработанности темы

Изучение скорости роста трещин усталости базируется на исследованиях механики разрушения. Большой вклад в развитие данного направления внесли А.А. Гриффитс, Дж.Р. Ирвин, Е.М. Морозов, В.З. Партон и др. В многочисленных работах по определению скорости роста трещины усталости (СРТУ) выявлены основные стадии роста трещины, включающие в себя инкубационный период зарождения трещины, медленный неустойчивый рост на первой стадии, второй устойчивый участок роста трещины и непродолжительный третий неустойчивый участок. Уравнение для описания СРТУ на втором устойчивом участке, являющегося наиболее важным для прогнозирования роста трещины, предложено П. Пэрисом.

Снижение скорости роста трещины усталости в вакууме для зарубежных сплавов приводится в многочисленных исследованиях. Такие исследования проведены для ряда никелевых гранульных сплавов, используемых при производстве дисков ГТД, таких как Rene 95, Waspaloy, RR1000, Udimet 720Li, N18 и других. Во всех случаях испытания были проведены на плоских образцах на внецентренное растяжение (ОВР). Для имитации развития внутренних трещин используется вакуумная камера.

Применение свойств СРТУ предложено в зарубежном программном комплексе по определению ресурсных показателей деталей по КБРД на основе вероятностного подхода DARWIN.

Методика ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» по определению долговечности, периодичности инспекций и назначенного ресурса ОД ГТД по КБРД, разработанная Потаповым С.Д., требует учитывать внутренние дефекты при определении ресурсных показателей. При отсутствии характеристик скорости роста трещины усталости в вакууме требуется использовать свойства СРТУ,

полученные на воздухе (в запас). Полученные таким образом результаты снижают точность определения остаточного ресурса.

В настоящее время не существует исследований по определению СРТУ в вакууме для отечественных гранульных никелевых сплавов. Данное явление можно связать со способом проведения испытаний. Испытания проводятся на плоских образцах на внецентренное растяжение (ОВР) и для определения СРТУ в вакууме необходимо наличие вакуумной камеры, что приводит к высоким материальным затратам.

В связи с отсутствием вакуумных камер в составе испытательных установок определение ресурсных показателей дисков двигателя АЛ-41Ф-1С, изготовленных из никелевого гранульного сплава, проводилось без учета характеристик СРТУ в вакууме (в запас).

Проведенный анализ результатов исследований российских и зарубежных ученых по исследованию характеристик и влиянию на ресурс скорости роста внутренних трещин в вакууме свидетельствует о следующем:

- проблема исследования характеристик СРТУ в вакууме является одной из актуальных;

- существуют подтверждения снижения СРТУ в вакууме по сравнению с трещиной на воздухе для ряда зарубежных никелевых гранульных сплавов;

- для отечественных никелевых гранульных сплавов данные исследования не проводились. Проведение аналогичных испытаний для отечественных сплавов требует наличие специализированной материальной базы в виде вакуумной камеры и соответствующих материальных затрат;

- неизвестно влияние характеристик СРТУ в вакууме на ресурс дисков ГТД.

Объектом исследования является диск ГТД, изготовленный из никелевого гранульного сплава.

Предметом исследования являются характеристики СРТУ в вакууме и их влияние на ресурс дисков ГТД, изготовленных из никелевых гранульных сплавов.

Цель исследования:

Определение влияния СРТУ в вакууме на ресурс дисков ГТД, изготовленных из никелевого гранульного сплава ЭП741НП.

Решены следующие научные задачи, позволившие достичь цели исследования:

1. определены геометрические размеры и условия циклических испытаний специальных образцов с целью получения СРТУ в вакууме;

2. обработаны результаты циклических испытаний для построения кинетических диаграмм (КД) усталостного роста трещины в вакууме и получения характеристик СРТУ в вакууме;

3. выполнена оценка влияния полученных характеристик СРТУ в вакууме на ресурсные показатели дисков ГТД.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты анализа определения влияния скорости роста трещины усталости в вакууме на ресурс дисков, изготовленных из сплава ЭП741НП;
- способ обработки результатов испытаний специальных образцов на СРТУ;
- оценка характеристик СРТУ в вакууме сплава ЭП741НП.

Научная новизна результатов исследования:

1. выполнен анализ влияния СРТУ в вакууме на ресурс дисков ГТД, изготовленных из никелевого гранульного сплава ЭП741НП;
2. разработан расчетно-фрактографический способ обработки результатов циклических испытаний цилиндрических образцов с внедренным дефектом для построения КД;
3. получены КД усталостного роста на воздухе и в вакууме в цилиндрических образцах из никелевого гранульного сплава ЭП741НП, используемые для определения характеристик СРТУ;
4. получена оценка характеристик СРТУ в вакууме для гранульного никелевого сплава ЭП741НП.

Личный вклад автора:

- исследовано влияние СРТУ в вакууме на ресурс дисков, изготовленных из сплава ЭП741НП;
- разработан расчетно-фрактографический способ получения характеристик СРТУ;
- выполнено построение конечно-элементных моделей образцов с реконструкцией геометрии фронта трещины по результатам фрактографического анализа;
- получены КД усталостного роста трещины на воздухе и в вакууме;
- выполнена оценка характеристик СРТУ в вакууме сплава ЭП741НП.

Достоверность и обоснованность научных результатов, достигается использованием современного математического аппарата, корректным применением достижений в области фундаментальных наук, теории прочности и математических моделей. Экспериментальные результаты определения СРТУ на предложенных цилиндрических образцах показали сходимость с результатами определения СРТУ образцов на внецентренное растяжение.

Практическая значимость работы

1. Использование при расчетах ресурса дисков ГТД из сплава ЭП741НП результатов оценки СРТУ в вакууме позволяет наиболее полно использовать потенциальные возможности по ресурсу.

2. Разработанный способ обработки результатов циклических испытаний цилиндрических образцов с внедренным дефектом позволяет получить КД усталостного роста трещины.

3. Полученная в результате построения КД оценка величины СРТУ в вакууме сплава ЭП741НП позволяет использовать ее в расчетах ресурса дисков ГТД из данного сплава.

4. Показано, что использование СРТУ в вакууме существенно влияет на ресурсные показатели дисков ГТД.

Реализация работы

Результаты работы по оценке СРТУ в вакууме и определению влияния скорости усталости в вакууме на ресурс дисков ГТД используется в управлении прочностью ОКБ им. А. Льюльки – филиале ПАО «ОДК-УМПО». В частности, результаты работы использованы при корректировке ресурса дисков двигателя АЛ-41Ф-1С на основе данных серийной эксплуатации.

Методология исследования

В работе использовались методы численного моделирования и системного анализа, теории упругости и механики разрушения. Для моделирования физики деформируемого твердого тела использовался метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе Ansys. Применялась концепция безопасного развития дефекта по вероятностному подходу в программном комплексе DARWIN.

Полученные результаты могут использоваться:

- в гражданских НИИ и НИИ Министерства обороны РФ при разработке технических требований к создаваемым ГТД и летательным аппаратам;
- в работе конструкторских бюро, разрабатывающих авиатехнику и средства ее контроля;
- в эксплуатирующих организациях при определении расходования ресурса ОД ГТД;
- в учебном процессе высших учебных заведений.

Апробация

Основные результаты диссертационной работы докладывались на международной научно-технической конференции «Климовские чтения – 2018» (АО «ОДК-Климов», г. Санкт-Петербург, 2018 г.), на международной научно-технической конференции по авиационным двигателям ICAM-2020 (ЦИАМ, г. Москва, 2021 г.), на 6-й международной научно-технической конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение ЖивКом – 2022» (ИМАШ РАН, г. Москва, 2022 г.), на научно-технической конференции им. Н.Д. Кузнецова «Перспективы развития двигателестроения» (Самарский университет, г. Самара, 2023 г.).

Публикации

Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 публикациях, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 3 статьи.

В рамках диссертационной работы получено 2 свидетельства о регистрации программы ЭВМ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения по работе, списка использованных источников из 95 наименований и приложения. Общий объем – 110 страниц, содержит рисунков – 63, таблиц – 13.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности исследований и определены объект и предмет исследования, основные методы, цели и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость работы, а также сформулированы основные положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор литературы и постановка задачи.

Показано, что наибольший вклад в накопление повреждения дисков ГТД вносит механизм МЦУ.

Широкое распространение в производстве дисков ГТД получила технология изготовления заготовок методами гранульной металлургии, позволяющая получать детали, обладающие высокими прочностными свойствами и структурной однородностью. К недостаткам технологии относятся наличие в структуре сплава неметаллических включений (дефектов), служащих очагами зарождения усталостных трещин.

Дефекты могут располагаться на поверхности и внутри материала. В соответствии с этим трещины, развивающиеся от дефектов, подразделяются на поверхностные и внутренние. Развитие поверхностных трещин происходит в условиях доступа окружающей среды (воздуха) в вершину трещины, тогда как внутренние трещины изолированы от окружающей среды и развиваются в условиях вакуума.

Показано, что на скорость роста усталостной трещины оказывает влияние окружающая среда. Рассмотрены исследования, показывающие снижение скорости роста трещины в вакууме для зарубежных никелевых гранульных сплавов.

Существующие требования нормативной документации требуют подтверждения ресурса ОД, в число которых входят диски ГТД, на основе КБРД, основанной на механике разрушения. Для проведения расчетов по концепции требуется определение характеристик СРТУ. При отсутствии характеристик СРТУ в вакууме для определения ресурса дисков от внутренних дефектов

применяются характеристики СРТУ на воздухе. При этом число внутренних дефектов значительно превышает число поверхностных дефектов в объеме детали, что приводит к снижению достоверности расчета, занижению оценки ресурса и, впоследствии, к увеличению стоимости жизненного цикла двигателя.

Для отечественных гранульных никелевых сплавов испытания по определению СРТУ в вакууме не проводились из-за сложностей, сопряженных с данными испытаниями. Главным образом из-за отсутствия вакуумных камер в составе испытательных установок. Испытания проводятся преимущественно на образцах с поверхностно нанесенной трещиной. Одним из наиболее используемых при испытаниях является плоский образец на внецентренное растяжение (ОВР). Если получение СРТУ на воздухе не представляет собой сложности, т.к. испытания проходят в лаборатории в нормальных условиях, то для получения СРТУ в вакууме необходимо поместить образец в вакуумную камеру.

В результате проведенного анализа сделан вывод, что для проведения исследования влияния СРТУ в вакууме на ресурс дисков ГТД необходимо использовать образцы оригинальной конструкции.

Во второй главе приводится описание разработки специальных образцов для определения СРТУ в вакууме.

Для решения задачи определения характеристик СРТУ в вакууме без использования вакуумной камеры для гранульного никелевого сплава ЭП741НП предложены специальные образцы, представленные на рисунке 1. Концепция образцов предложена сотрудником ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» С.Д. Потаповым.

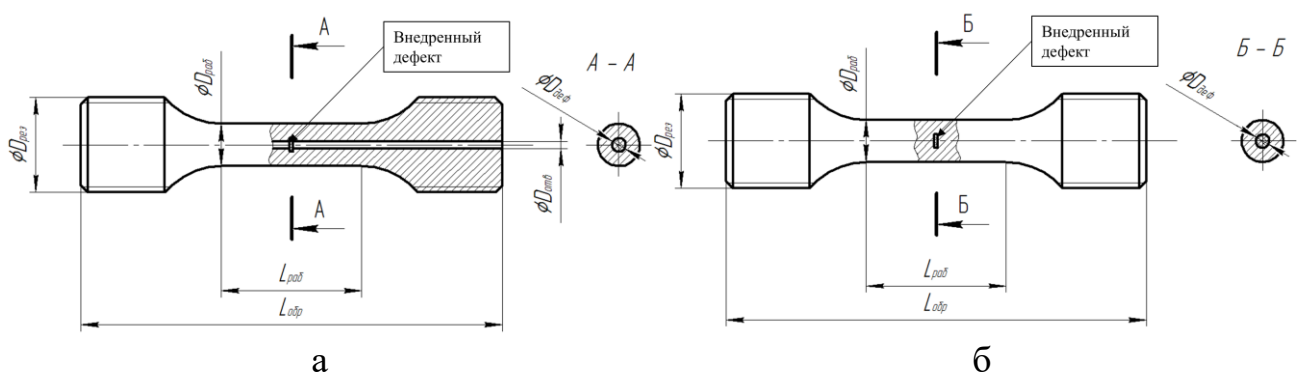


Рисунок 1 – Образцы: а – вентилируемый; б - невентилируемый

Образцы имеют цилиндрическую форму, сходную с формой образцов, используемых для испытаний на малоцикловую усталость, но отличаются наличием в центре рабочей части плоского неметаллического дефекта, расположенного перпендикулярно оси образца.

Данный дефект выполняет функцию, аналогичную надрезу в ОВР. При циклическом нагружении от нагрузки, направленной по оси образца, от внедренного дефекта развивается усталостная трещина.

Два типа специальных образцов – вентилируемый (рисунок 1а) и невентилируемый (рисунок 1б) – имеют длину и посадочный диаметр рабочей части $L_{\text{раб}}$ и $D_{\text{раб}}$, общую длину и посадочный диаметр резьбы $L_{\text{обр}}$ и $D_{\text{рез}}$. В центре рабочей части располагается начальный дефект диаметром $D_{\text{деф}}$. Отличием вентилируемого образца от невентилируемого является наличие сквозного осевого отверстия диаметром $D_{\text{отв}}$ для подвода воздушной среды к вершине трещины. Соответственно невентилируемый образец служит для получения характеристик СРТУ в вакууме, а вентилируемый – для получения характеристик СРТУ на воздухе.

Испытания проводятся до разрушения образцов. В дальнейшем, с помощью электронной микроскопии, исследуется поверхность излома образца, восстанавливаются фронты распространения трещины и производится поиск участков, на которых наблюдается формирование усталостных бороздок.

Наличие усталостных бороздок характеризует развитие трещины на втором, устойчивом участке развития трещины, описываемым уравнением Пэриса. Ширина шага d усталостных бороздок соответствует величине приращения длины трещины за один цикл нагружения dl/dN .

Получение значений КИН, необходимых для построения КД, возможно при реконструкции формы трещины (при фрактографических исследованиях) с последующим моделированием методом конечных элементов (МКЭ).

Диаметры образца и дефекта подбирались таким образом, чтобы при заданной максимальной нагрузке цикла нагружения P_{max} в сечении с трещиной обеспечивалась величина номинальных напряжений $\sigma_{\text{ном}}$ меньше предела пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$ материала образца при температуре испытаний. При этом напряжения $\sigma_{\text{ном}}$ должны быть достаточно высокими, чтобы происходил устойчивый рост трещины, соответствующий второму участку КД.

Размещение неметаллического дефекта диаметром 4 мм в образце происходило на этапе засыпки гранул в капсулу. Сквозное отверстие в вентилируемых образцах выполнялось методом электроискрового прожига.

Третья глава посвящена обработке результатов испытаний, построению КД и оценке характеристик СРТУ в вакууме.

Циклические испытания образцов из сплава ЭП741НП с крупностью гранул до 140 мкм выполнены на испытательных машинах Amsler 300 и LFV-100НН в мягком цикле нагружения при постоянной максимальной нагрузке цикла, коэффициенте асимметрии 0,1, частотах нагружения от 0,5 до 90 Гц и температуре испытаний 400 °С. Испытания проведены до разрушения образцов.

Выбор температуры испытаний 400 °С основывается на том, что данная температура входит в диапазон работы дисков ГТД, изготавливаемых из исследуемого сплава, а также из-за уменьшения интенсивности окисления,

оказывающей влияние на видимость усталостных бороздок, по сравнению с более высокими температурами.

В таблице 1 представлены данные о количестве циклов до разрушения вентилируемых и невентилируемых образцов. По результатам первого испытания (образец 2) проводилась доработка геометрии рабочей части остальных образцов и корректировалась максимальная нагрузка в цикле нагружения. Разрушение образцов 1 и 4 произошло в резьбовой части и данные образцы в дальнейшей обработке не участвовали.

Таблица 1 – Результаты циклических испытаний

Тип образца	Вентилируемые			Невентилируемые		
	2	6	8	3	5	7
Номер образца	2	6	8	3	5	7
$D_{раб} / D_{деф}$	4,5	3	3	3	3	3
P_{max} , Н	90 000	50 000	50 000	50 000	50 000	50 000
$\sigma_{ном}$ В МОМЕНТ начала испытаний, МПа	354	442	442	442	442	442
Место разрушения	Отверстие	Отверстие	Дефект	Дефект	Дефект	Дефект
Частота нагружения, Гц	0.5	88	89	92	92	92
Число циклов до разрушения	136 550	284 861	139 495	2 228 935	2 900 504	2 923 515
Среднее число циклов до разрушения	-	212 178		2 684 318		

Как показали результаты испытаний, среднее число циклов до разрушения для невентилируемых образцов (3, 5, 7) в 12,7 раз больше, чем для вентилируемых (6, 8), что указывает на значительно более медленное развитие трещины в вакууме. В данном сравнении не учитывался образец 2, так как его диаметр больше, а номинальные напряжения в сечении с трещиной меньше, чем для остальных образцов.

На рисунках 2 и 3 представлены поверхности изломов образцов с нанесенными на них местами замера ширины шага усталостных бороздок, полученные на электронном микроскопе. На изображениях отмечены номерами: 1 – граница перехода участка устойчивого роста трещины к III неустойчивому участку (далее граница устойчивого роста, ГУР); 2 – внедренный дефект; 3 – сквозное осевое отверстие в вентилируемых образцах; 4 – расслаивание материала. Необходимо отметить, что на изображениях приведены только измеренные блоки усталостных бороздок, так же они наблюдаются в других аналогичных местах изломов образцов.

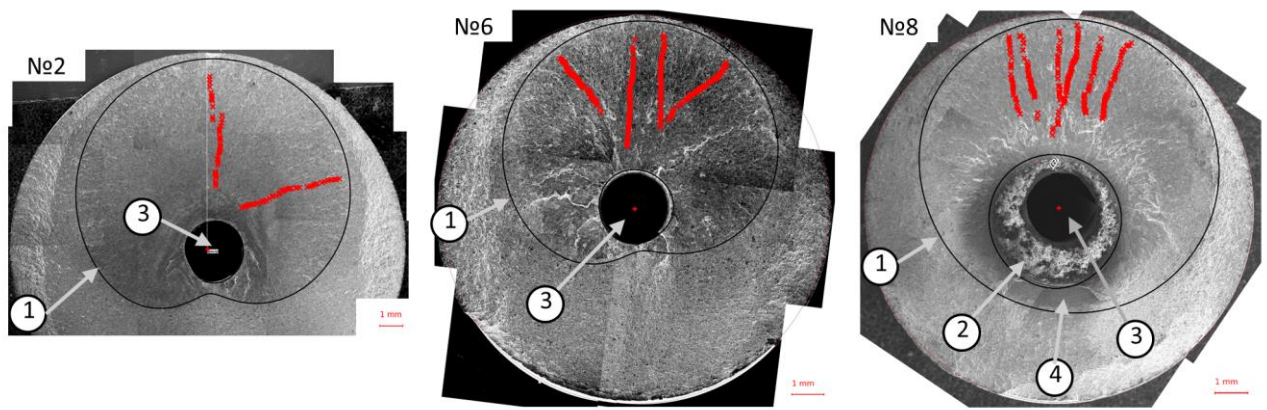


Рисунок 2 – Поверхности излома вентилируемых образцов

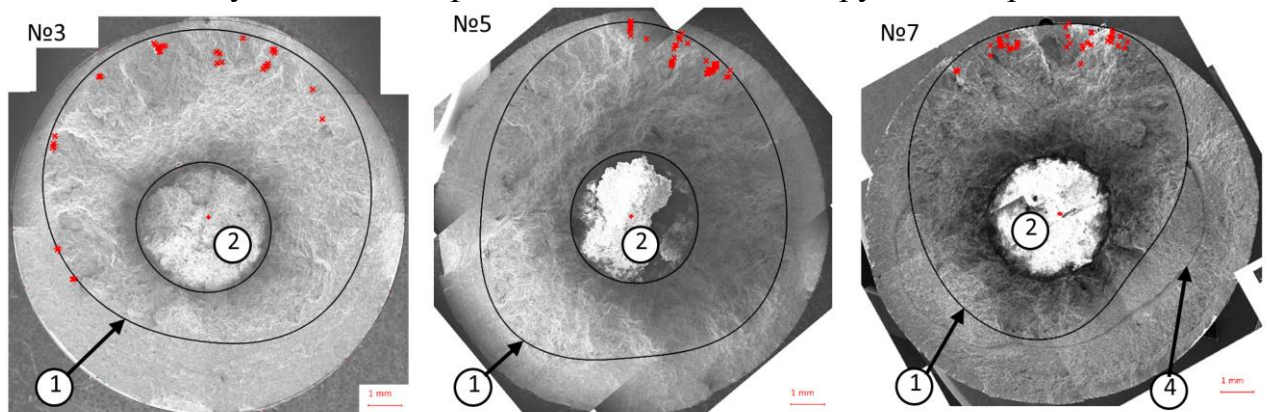


Рисунок 3 – Поверхности излома невентилируемых образцов

Для вентилируемых образцов (рисунок 2) формирование усталостных бороздок наблюдается практически по всей площади распространения трещины, кроме участка вблизи дефекта, что свидетельствует о том, что рост трещины происходил преимущественно (практически от зоны зарождения трещины) по механизму устойчивого роста. Формирование усталостных бороздок в невентилируемых образцах (рисунок 3) наблюдается в узкой зоне только на границе перехода усталостной трещины к неустойчивому росту. Это свидетельствует о том, что рост трещины происходил преимущественно при низких СРТУ, соответствующих механизму неустойчивого роста трещины.

Вентилируемые образцы 2 и 6 разрушились в рабочей части не по месту расположения дефекта. Разрушение данных образцов не от керамического дефекта обусловлено образованием концентратора напряжений на поверхности сквозного отверстия диаметром 2 мм, изготавливаемого методом электроискрового прожига. В остальных случаях разрушение происходило от трещины, развившейся от внедренного дефекта.

Несимметричность фронта трещины относительно центра образца связана с наличием изгиба образцов при проведении испытаний и с очаговым характером зарождения трещины. Трещина в образце 5 имеет наиболее близкую к симметрии форму по сравнению с остальными образцами, при этом замеренный изгиб в

образце 5 составляет не более 4%. В образце 7, имеющем такой же уровень изгиба, наблюдается расслаивание, влияющее на форму трещины. В образце 8 так же отмечено расслаивание материала, влияющее на форму фронта трещины.

Для автоматизации процесса измерения шага усталостных бороздок разработана методика, основанная на использовании вейвлет-преобразований. Методика заключается в получении сигнала в виде графиков изменения яркости вдоль направления развития трещины (перпендикулярно усталостным бороздкам, рисунок 4а). Далее на полученных функциональных зависимостях применяется вейвлет-преобразование для получения спектра мощности сигнала (рисунок 4б). На практике по данному спектру невозможно определить периодичность сигнала. Поэтому следующим этапом спектр мощности преобразуется в кумулятивный спектр. Далее проводится последующее дифференцирование кумулятивного спектра, в результате которого получен спектр распределения локальных максимумов $P(r)$, где r – период (рисунок 4в). Для возможности анализа данного спектра проводится усреднение по оси длины спектра (рисунок 4г). Находится экстремум функции $P(r)$, при этом значение r – для данного экстремума определяет размер, соответствующий шагу усталостных бороздок.

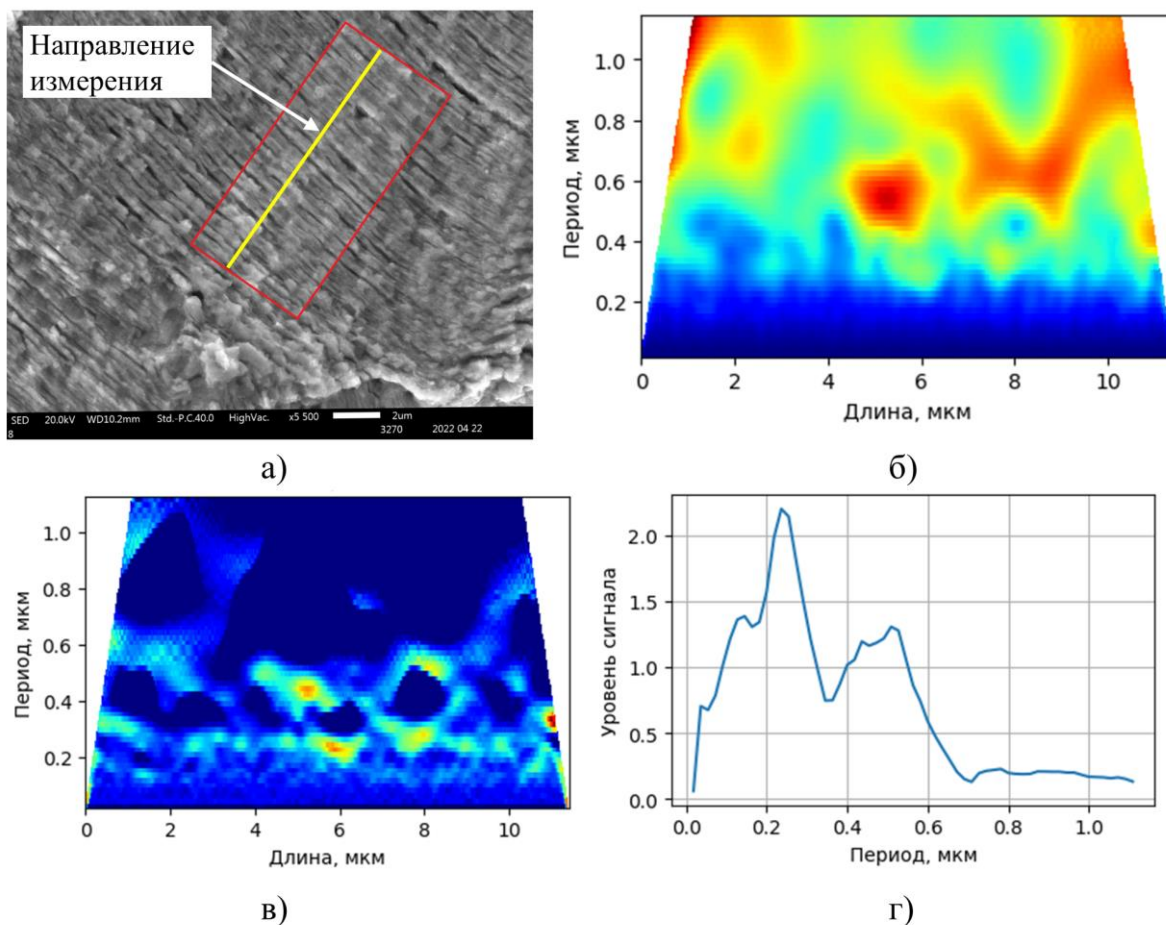


Рисунок 4 – Измерение ширины шага усталостных бороздок: а – поверхность исследования, б – вейвлет-преобразование сигнала яркости изображения, в – спектр производной, г – осреднение спектра производной

На основе предложенной методики разработана и зарегистрирована программа на языке программирования Python – «Cumulet». Для вейвлет-преобразования использовалась программная библиотека PyWavelets.

Определение формы фронта трещины в процессе ее роста от начального дефекта и до ГУР выполнено по двум подходам. Подход I основывался на предположении, что в процессе роста фронт трещины линейно трансформируется от геометрии начального дефекта до геометрии ГУР трещины (рисунок 5а). Недостатком данного подхода является то, что в реальности фронт трещины может отличаться от модели.

В подходе II геометрия фронта трещины определялась с учетом скоростей роста трещины, определенных с помощью усталостных бороздок. Как видно из рисунка 2, в вентилируемых образцах определение размера шага усталостных бороздок выполнено вдоль линий, расходящихся лучами от центра к периферии излома образца. Вдоль каждой линии по размеру шага усталостных бороздок и расстоянию между усталостными бороздками определялось число циклов роста трещины. От ГУР за равное число циклов вдоль каждого из направлений трещина вырастала на определенное расстояние, фиксируемое точками на фронте. Промежуточная геометрия фронта трещины определялась через данные точки (рисунок 5б). Преимуществом подхода II по сравнению с подходом I является опора на фрактографический анализ и учет скоростей роста трещины на разных участках при определении формы трещины. Однако подход II не использовался при определении формы фронта трещины для невентилируемых образцов из-за отсутствия необходимых данных для построения.

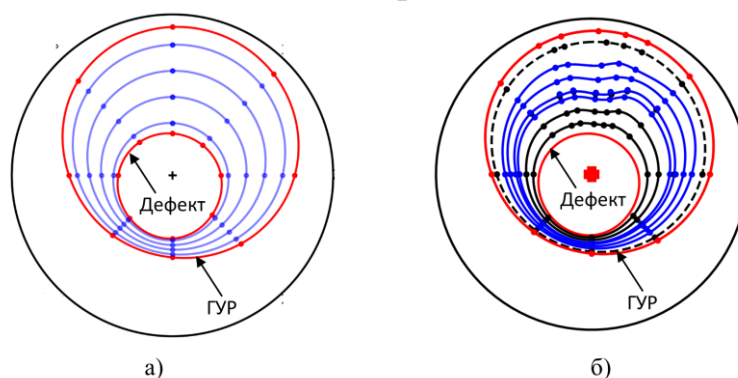


Рисунок 5 – Форма фронта трещины: а – по подходу I; б – по подходу II.

Расчетная модель для определения размахов КИН представлена на рисунке 6.

Модель представляет собой половину рабочей части образца, рассеченной в плоскости распространения трещины. Симметрия задавалась в виде закрепления по оси Z. К торцу модели образца приложена сила по оси Z, равная нагрузке в процессе испытаний и приложено окружное закрепление вокруг оси образца. Для моделей образцов, в которых при проведении испытаний были определены

величины изгиба, в один из вариантов расчета приложен момент, соответствующий величине изгиба. Плоскость действия момента соответствует преобладающему направлению развития трещины.

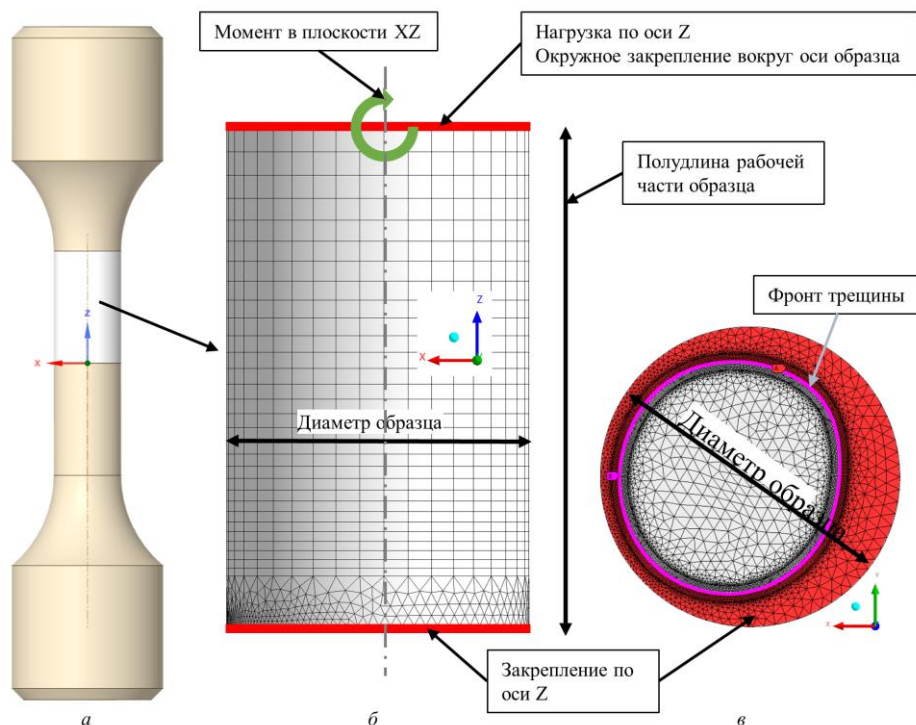


Рисунок 6 – Расчетная модель образца с трещиной: а – геометрическая модель образца; б – общий вид расчетной модели; в – вид модели со стороны плоскости трещины

Расчет каждого образца выполнялся для двух вариантов фронтов трещины в программном комплексе Ansys.

Пример распределения размахов КИН для образца 8, полученных по двум подходам, приведен на рисунках 7 и 8. Форма фронта трещины образца 8 по подходу II отличается вогнутостью в исследуемой области (в диапазоне угловой координаты $(315^\circ \dots 0^\circ \dots 45^\circ)$) в отличие от подхода I. За счет этого в исследуемой области увеличивается размах КИН (рисунок 8). Величина изгиба образцов до 20% оказывает влияние на КИН не более 5% для всех исследуемых образцов. В дальнейшем анализе изгиб не учитывался.

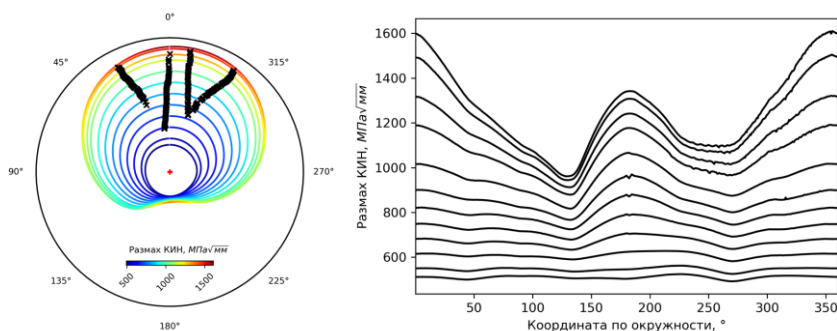


Рисунок 7 – Форма фронта трещины и распределение размахов КИН по подходу I

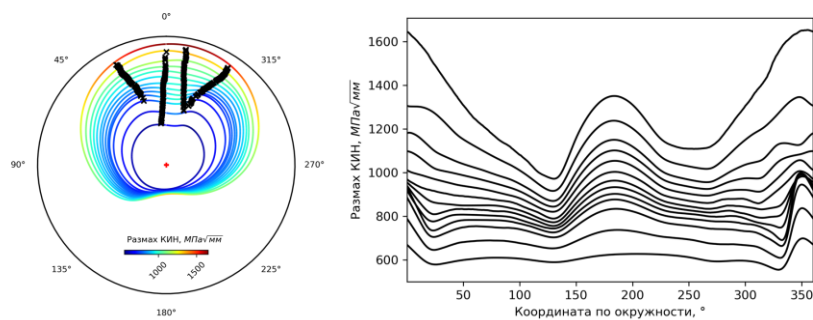


Рисунок 8 – Форма фронта трещины и распределение размахов КИН по подходу II

Полученные фрактографическим и расчетным методами скорость роста трещины и размах КИН соответственно, использованы для построения КД и получения коэффициентов уравнения Пэриса методом наименьших квадратов.

Уравнение Пэриса, описывающее устойчивый участок роста трещины

$$\frac{dl}{dN} = C \Delta K^m, \quad (1)$$

где C , m – коэффициенты уравнения, получаемые на основе экспериментальных данных, $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ – размах КИН за один цикл нагружения, K_{max} – КИН, соответствующий полуциклу нагрузки, K_{min} – полуциклу разгрузки.

Оси КД строятся в логарифмических координатах. Для применения линейной регрессии в случае степенной зависимости, к которой относится уравнение Пэриса, было выполнено превращение путем логарифмирования

$$\lg\left(\frac{dl}{dN}\right) = \lg(C) + m \cdot \lg(\Delta K). \quad (2)$$

На рисунке 9 приведены КД для всех испытанных образцов в логарифмических координатах. Данные размаха КИН для невентилируемых образцов 3, 5, 7 и вентилируемого образца 2 получены по подходу I. Данные для вентилируемых образцов 6 и 8 получены по подходу II. При определении КД образцов 2, 6 и 8 было проведено усреднение результатов. Для сравнения на КД нанесены характеристики СРТУ, полученные на ОВР для данного материала с аналогичной крупностью гранул и температурой испытаний. Данные для ОВР приведены как оригинальные, полученные из испытаний (далее обозначены как «ОВР ($k=1,00$)»), так и модифицированные с учетом влияния эллипсности трещины на СРТУ (обозначение «ОВР ($k=1,25$)»). Модификация основана на том, что характеристики СРТУ эллиптических трещин имеют более высокие скорости роста при тех же условиях по сравнению с трещинами с прямолинейным фронтом, получаемым в образцах ОВР.

Для невентилируемых образцов невозможно определить коэффициенты уравнения Пэриса методом линейной регрессии, так как все найденные бороздки во фрактографическом анализе располагаются в узкой зоне вблизи ГУР и

фактически представляют собой относительно узкий участок на КД в области высоких (по сравнению с вентилируемыми образцами) значений размахов КИН.

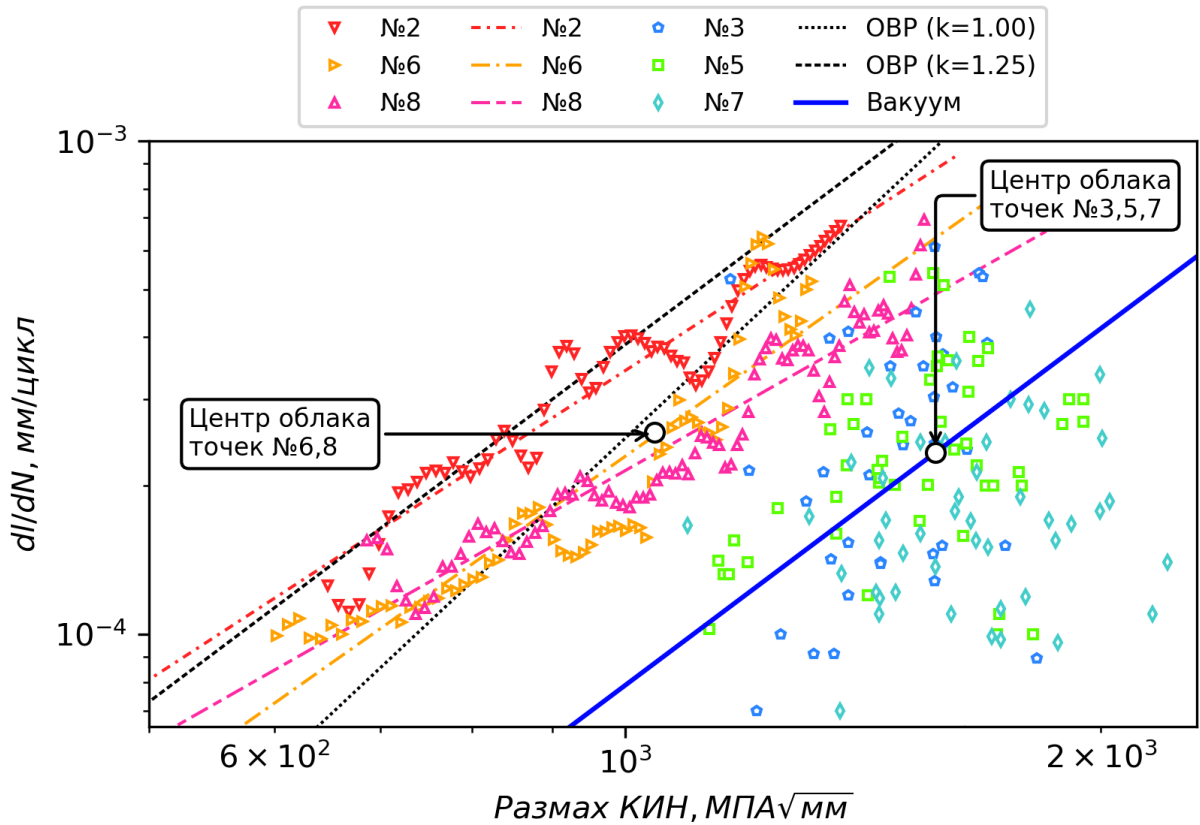


Рисунок 9 – КД испытанных образцов

Оценка характеристики СРТУ в вакууме выполнялась в предположении, что коэффициент m уравнения Пэриса, характеризующий угол наклона КД, для результатов на воздухе и в вакууме практически совпадает, а отличается только коэффициент C . Данная особенность наблюдается в зарубежных никелевых гранульных сплавах Rene 95, Waspaloy, Udimet (рисунок 10).

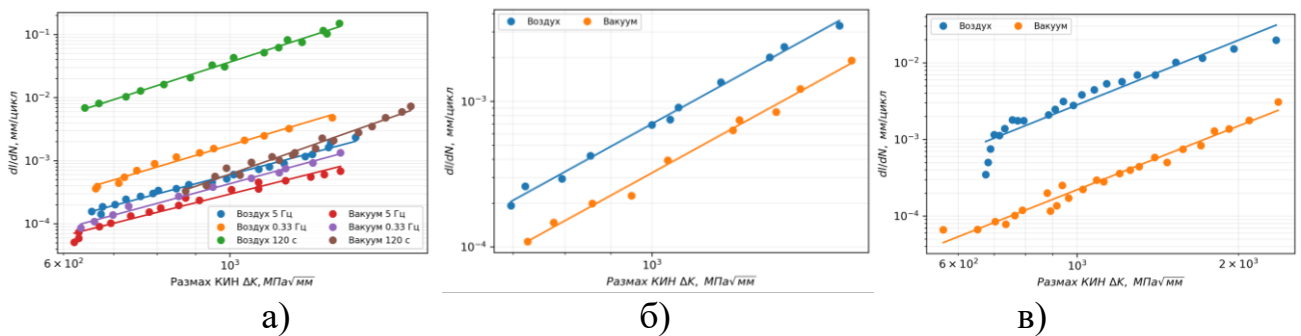


Рисунок 10 – КД сплавов: а – Rene 95; б – Waspaloy; в – Udimet 720 Li

Центр облака точек вентилируемых образцов 6 и 8 (рисунок 9) находится вблизи (отклонение в скорости роста 10%) прямой, характеризующей СРТУ ОВР ($k = 1,00$). Можно предположить, что центр облака точек для невентилируемых образцов так же находится вблизи предполагаемой прямой, характеризующей СРТУ в вакууме, при этом наклон данной прямой (коэффициент m уравнения Пэриса) соответствует СРТУ, полученной при испытаниях ОВР на воздухе.

В качестве характеристики $m_{\text{вакуум}}$ СРТУ в вакууме в запас принят коэффициент для ОВР ($k = 1,25$). Характеристика $C_{\text{вакуум}}$ уравнения Пэриса определялась по следующей формуле

$$C_{\text{вакуум}} = \frac{d_{\text{центр}}}{K_{\text{центр}} m_{\text{вакуум}}}, \quad (3)$$

где $d_{\text{центр}}$, $K_{\text{центр}}$ – координаты центра облака точек неветилируемых образцов (рисунок 9). Определенные характеристики СРТУ в вакууме на рисунке 9 представлены в виде сплошной синей линии.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния СРТУ в вакууме на ресурсные показатели дисков ГТД, изготовленных из никелевого гранульного сплава ЭП741НП.

Расчет проводился по КБРД по вероятностному подходу. Данный подход основан на том, что дефекты разной природы и размеров распределены по объему диска.

Результатом расчета является получение зависимости вероятности разрушения P_d от числа полетных циклов (ПЦ) $N_{\text{ПЦ}}$.

$$P_d = f(N_{\text{ПЦ}}) \quad (4)$$

Долговечностью диска является количество ПЦ, соответствующих допустимой вероятности разрушения $P_{\text{доп}} \leq 10^{-4}$.

Для расчета вероятности разрушения используются следующие данные:

1. Вероятностная кривая распределения дефектов в материале и при механической обработке.
2. Вероятностная кривая выявляемости дефектов для методов неразрушающего контроля (при наличии таких исследований).
3. Напряженно-деформированное состояние (НДС) диска на режимах, соответствующих обобщенному типовому полетному циклу (ОТПЦ).
4. Вид и количество ОТПЦ.
5. Данные о характеристиках СРТУ.

При расчете по вероятностному подходу весь объем детали разбивается на поверхностные и внутренние зоны. Каждая из зон характеризуется малым градиентом изменения величины напряжений и температуры. В пределах каждой из зон трещина должна иметь близкие характеристики СРТУ. При выполнении данного условия соблюдается одинаковое время развития трещины при любом ее расположении в пределах данной зоны.

Вероятность разрушения диска определяется как вероятность объединения событий, заключенной в разрушении из-за дефекта в любой из зон диска. Вероятность разрушения от дефекта в каждой зоне зависит от вероятности попадания дефекта в зону. Вероятность попадания определяется с помощью

зависимости плотности распределения дефектов в материале от размера дефектов. Зная число циклов роста трещины от размера дефекта и до критической длины можно найти вероятность разрушения в каждой зоне и, в дальнейшем, во всем диске. Данный алгоритм реализован в программном продукте DARWIN, который был использован для создания моделей и проведения расчета.

Исследование влияния СРТУ в вакууме выполнено для двух разных дисков – диска 7 ступени компрессора высокого давления (КВД) и диска турбины высокого давления (ТВД) турбореактивного двухконтурного двигателя с форсажной камерой сгорания (ТРДДФ) АЛ-41Ф-1С. Данные диски изготовлены из никелевого гранульного сплава ЭП741НП с крупностью гранул до 140 мкм.

Данные диски имеют разную толщину и температурное состояние в эксплуатации. Толщина диска влияет на отношение количества внутренних дефектов к поверхностным. Чем больше толщина диска, тем больше внутренних дефектов по сравнению с поверхностными и тем больше влияние внутренних дефектов на ресурсные показатели диска. Условно принято, что поверхностная зона занимает объем диска от поверхности на глубину 0,5 мм вглубь (рисунок 11). В таком случае доля объема внутренних зон к общему объему диска составляет 63% для диска 7 ступени КВД и 95% для диска ТВД. Так как дефекты в материале распределены равномерно, следовательно, доли внутренних и поверхностных дефектов к общему числу дефектов соответствует долям объема внутренних и поверхностных зон диска.

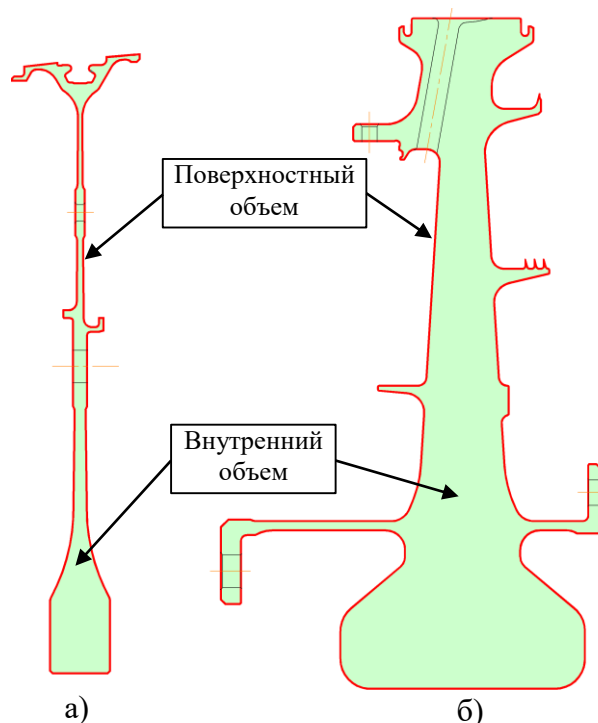


Рисунок 11 – Поверхностные (красные) и внутренние (зеленые) объемы:
а – диск КВД; б – диск ТВД

На рисунке 12 приведено разбиение на внутренние зоны исследуемых дисков. В каждой из зон моделируется развитие трещины в плоскости, зависящей от ориентации первых главных напряжений.

Определение НДС дисков выполнено в двумерной осесимметричной упругой постановке в программном комплексе Ansys на режимах, характеризующих максимальную полную температуру перед КВД или ТВД при разных настройках системы автоматического управления и для режимов малый газ и крейсер.

В качестве характеристик СРТУ на воздухе используются характеристики, полученные при испытании ОВР из сплава ЭП741НП. В качестве характеристик СРТУ в вакууме используются характеристики, полученные при испытаниях специальных образцов.

Кривая распределения дефектов в сплаве ЭП741НП получена из исследований по определению числа и размеров дефектов на рентгеновском томографе.

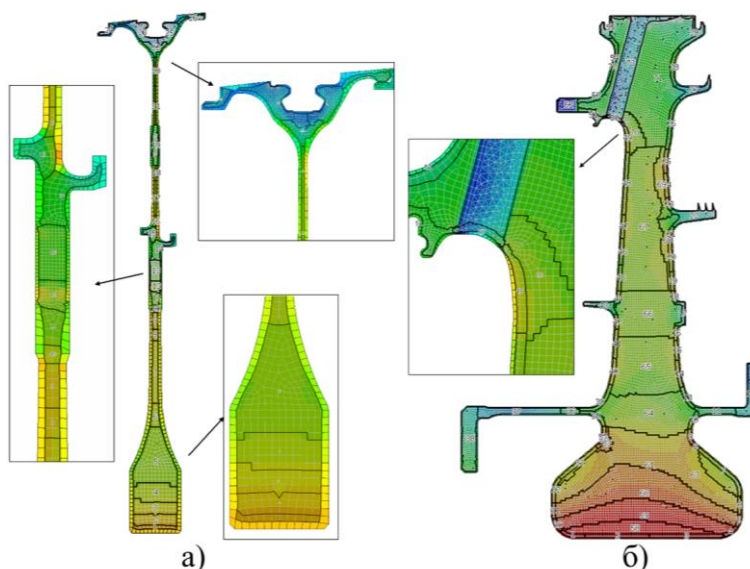


Рисунок 12 – Внутренние зоны:
а – диск КВД; б – диск ТВД

На основе представленных данных произведена оценка долговечности дисков от внутренних дефектов исследуемых дисков для ОТПЦ двигателя АЛ-41Ф-1С. В качестве характеристик СРТУ для трещин от внутренних дефектов для сравнения задавались характеристики на воздухе и в вакууме.

В таблицу 2 сведены результаты расчета долговечности при допустимой вероятности разрушения 10^{-4} , полученные для циклического нагружения дисков по ОТПЦ. Результаты представлены в долях от полного назначенного ресурса двигателя АЛ-41Ф-1С.

Таблица 2 – Долговечность дисков от внутренних дефектов

Диск	Характеристики СРТУ для внутренних трещин	Долговечность по ОТПЦ в долях от полного назначенного ресурса, %
7 ступень КВД	СРТУ на воздухе	159
7 ступень КВД	СРТУ в вакууме	981
ТВД	СРТУ на воздухе	40
ТВД	СРТУ в вакууме	254

При расчете долговечности по ОТПЦ диска ТВД от внутренних дефектов с характеристиками СРТУ на воздухе не обеспечивается полный назначенный ресурс. При использовании характеристик СРТУ в вакууме долговечность диска 7 ступени и диска ТВД увеличилась более чем в 6 раз.

Как видно из представленных данных учет свойств СРТУ в вакууме существенно влияет на ресурсные показатели дисков, имеющих разную геометрию и условия эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на примере дисков КВД и ТВД ТРДДФ АЛ-41Ф-1С проведен анализ влияния скорости роста трещины усталости в вакууме на ресурсные показатели данных дисков.

Основные научные результаты:

1. Проведен анализ влияния СРТУ в вакууме на ресурс дисков, изготовленных из сплава ЭП741НП. Полученные результаты показывают, что учет свойств СРТУ в вакууме при расчете ресурсных показателей от внутренних дефектов увеличивает долговечность для рассматриваемых дисков в 6 раз по сравнению со свойствами СРТУ на воздухе. Учет свойств СРТУ в вакууме для дисков, изготовленных из гранульного никелевого сплава ЭП741НП, повышает достоверность расчета при определении ресурсных показателей.

2. На основе предложенной концепции по определению СРТУ в вакууме для гранульных никелевых сплавов без использования вакуумной камеры были определены геометрические параметры и условия испытаний специальных образцов двух типов – вентилируемых и невентилируемых. Вентилируемые образцы служат для получения характеристик СРТУ на воздухе, а невентилируемые – в вакууме.

3. По результатам испытаний образцов двух типов из гранульного никелевого сплава ЭП741НП показано, что среднее количество циклов до разрушения для невентилируемых образцов в 12,7 раз больше, чем для вентилируемых, что указывает на значительно более медленное развитие трещины в вакууме.

4. Разработан способ обработки результатов испытаний цилиндрических образцов с внедренным дефектом для построения КД усталостного роста трещины, включающий проведение фрактографических исследований и моделирование роста и формы трещины в образцах.

5. Получены КД усталостного роста трещины в специальных образцах. На их основе определены характеристики СРТУ в вентилируемых образцах, показывающие сходимость результатов испытаний с испытаниями, проведенными на ОВР.

6. На основе полученных КД усталостного роста трещины в специальных образцах невозможно выделить достаточно широкий для получения характеристик СРТУ участок устойчивого роста трещины в невентилируемых образцах. В соответствии с выдвинутым предположением о равенстве

коэффициента уравнения Периса m для условий вакуума и воздуха была выполнена оценка характеристик СРТУ в вакууме. Полученная оценка характеристик СРТУ в вакууме может быть использована в расчетах ресурса дисков ГТД, изготовленных из гранульного никелевого сплава ЭП741НП.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Гогаев Г.П., Немцев Д.В. Исследование влияния полетных условий на повреждаемость диска турбины высокого давления высокоманевренного летательного аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 1. С. 134 – 142.

2. Артамонов М.А., Немцев Д.В., Меденцов В.Э., Соловьев В.С. Исследование испытанных на малоцикловую усталость цилиндрических образцов из никелевого сплава ЭП741НП для определения параметров Периса и периода зарождения трещины // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. №56. 2019 г., с.103 – 113.

3. Немцев Д.В., Потапов С.Д., Артамонов М.А. Исследование циклической трещиностойкости в вакууме для дисков газотурбинного двигателя, изготавливаемых из гранулируемого никелевого сплава ЭП741НП // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 2. С. 99 – 105.

Программы, зарегистрированные в реестре программ для ЭВМ:

4. Свид. 2021661542 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. ЭксОРТ / Немцев Д.В., Гогаев Г.П.; заявитель и правообладатель ПАО «ОДК-УМПО» (RU). - №2021660763; заявл. 07.07.2021; опубл. 13.07.2021, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

5. Свид. 2022667078 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Cumulet / Артамонов М.А., Гогаев Г.П., Немцев Д.В.; заявитель и правообладатель ПАО «ОДК-УМПО» (RU). - №2022665574; заявл. 22.08.2022; опубл. 14.09.2022, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

Публикации по теме диссертации в материалах конференций:

6. Артамонов М.А., Немцев Д.В., Меденцов В.Э., Соловьев В.С. Исследование влияния температуры на усталостные характеристики гранулируемого никелевого сплава ЭП741НП // Климовские чтения – 2018. Перспективные направления развития авиадвигателестроения: сборник докладов международной научно-технической конференции (г. Санкт-Петербург, АО «ОДК-Климов»). СПб: Скифия-Принт. 2018. С. 144 – 153.

7. Артамонов М.А., Немцев Д.В., Меденцов В.Э., Соловьев В.С. Определение инкубационного периода и кинетики роста трещины малоциклового усталости в гранулируемом никелевом сплаве ЭП741НП при разных асимметриях цикла нагружения // ИСАМ 2020: сборник тезисов международной научно-технической конференции по авиационным двигателям (г. Москва, ЦИАМ им. П.И. Баранова). М.: ЦИАМ им. П.И. Баранова. 2020. С. 458 – 461.

8. Немцев Д.В., Артамонов М.А. Основанная на вейвлет-преобразовании методика для автоматизированного определения шага усталостных бороздок образцов, испытанных на МЦУ // Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ – 2022): сборник трудов VI Международной научно-технической конференции (27–29 октября 2022, Москва). М.: ИМАШ РАН. 2022. С. 265 – 268.

9. Немцев Д.В., Потапов С.Д., Артамонов М.А. Исследование скорости роста трещины усталости в вакууме сплава ЭП741НП // Перспективы развития двигателестроения: материалы докладов международной научно-технической конференции им. Н.Д. Кузнецова (г. Самара, Самарский университет). Том 2. Самара: Издательство Самарского университета. 2023. С.387 – 388.

10. Artamonov M.A., Nemtsev D.V., Medentsov V.E., Solovyev V.S. The Influence of Temperature and Stress Cycle Asymmetry at Fatigue Cracks Initiation and Propagation in Cylindrical Specimens of Ni-based Alloy EP741NP // Procedia Structural Integrity. 2019. Vol. 23, pp. 257 – 262.