

ХОДИНЕВ ИВАН АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОЦИКЛОВОЙ
УСТАЛОСТИ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ВЖ175 И ВКНА-1ВР**

Научная специальность: 2.6.17. – Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2025

Работа выполнена в федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ).

Научный руководитель: **Горбовец Михаил Александрович,**
кандидат технических наук, начальник испытательного центра
НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Официальные оппоненты: **Гусев Дмитрий Евгеньевич,**
доктор технических наук, доцент, профессор образовательного центра
института №11, с.н.с. лаборатории материаловедения,
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)»

Тихомирова Елена Александровна,
кандидат технических наук, начальник испытательной лаборатории по
исследованию деталей и узлов ИЦЗЛ службы главного металлурга,
АО «ОДК-Климов»

Ведущая организация: Акционерное общество «Национальный институт авиационных
технологий» (АО «НИАТ»)

Защита состоится «27» ноября 2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 31.1.002.01 при НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ по адресу: 105005, г. Москва, ул. Радио, д.17. Тел. 8 (499) 267-86-77, e-mail: admin@viam.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ и на сайте www.viam.ru.

Автореферат разослан «__»_____2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук _____Горбовец М.А.

© НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2025

© Ходинев И.А., 2025

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Авиационные газотурбинные двигатели (АГТД) включают в себя детали, воспринимающие высокие нагрузки, действующие длительно или периодически при высоких температурах. К таким деталям относятся диски и лопатки, и для их изготовления используют жаропрочные никелевые сплавы, сохраняющие высокие механические характеристики при повышенных температурах. Важное свойство, ограничивающее ресурс АГТД, – сопротивление малоциклового усталости (МЦУ) – процессу накопления повреждений и развития трещины при циклических нагрузках, превышающих предел текучести материала, то есть при упруго-пластическом деформировании.

Циклическое нагружение характеризуется не только пиковыми значениями, но и коэффициентом асимметрии цикла - отношением минимального значения напряжения или деформации к максимальному. Для расчета ресурса детали расчетчику нужно оценивать сопротивление усталости при произвольном коэффициенте асимметрии. Для решения этой задачи не существует универсальной методики, в связи с чем развитие методов оценки сопротивления усталости конструкционных материалов при асимметричном нагружении – актуальная задача.

При испытаниях на МЦУ в качестве контролируемого параметра нагружения может выступать как напряжение («мягкий» цикл), так и деформация («жесткий» цикл). С развитием технических возможностей испытательного оборудования для квалификации авиационных испытаний на МЦУ при «жестком» нагружении» стали обязательными, а при «мягком» – дополнительными, так как «жесткое» нагружение более близко к условиям эксплуатации наиболее опасных зон деталей АГТД, в которых происходит упруго-пластическое деформирование. Испытания на МЦУ при «мягком» цикле нагружения с регистрацией деформации представляет большой интерес – благодаря нему можно сопоставить справочные данные с вновь полученными, а также спрогнозировать такие опасные эффекты, как циклическая ползучесть.

При проведении общей квалификации (паспортизации) объем испытаний, как правило, ограничен минимально необходимым набором характеристик. Химический и фазовый состав сплавов, применяемых в АГТД, имеет значительные различия, механические свойства заготовок из сплавов отличаются и зависят не только от состава, но и от термообработки, кристаллографической ориентации, величины зерна и технологии изготовления полуфабриката (литье, деформирование или аддитивное производство). Выявление закономерностей изменения характеристик малоциклового усталости в зависимости от параметров нагружения и установление взаимосвязи параметров упруго-пластического деформирования при «мягком» и

«жестком» нагружении позволит проводить полную оценку долговечности и механизмов разрушения деталей из сплавов при варьировании их химической и фазовой структуры.

Целью диссертации является установление зависимости изменения характеристик малоциклового усталости образцов жаропрочных никелевых сплавов ВЖ175 и ВКНА-1ВР от параметров нагружения в условиях контролируемых деформации и напряжения.

Задачи диссертационной работы:

- исследовать влияние асимметрии цикла и температуры на сопротивление малоциклового усталости образцов из используемых в авиационной промышленности дискового жаропрочного никелевого деформируемого сплава ВЖ175 при температурах 20, 650, 750 °С и лопаточного литейного интерметаллидного жаропрочного никелевого сплава с равноосной структурой ВКНА-1ВР при температурах 20, 850, 1050 °С в условиях контролируемых деформации и напряжения («мягкого» и «жесткого» нагружения);

- установить связь между механизмами разрушения и параметрами нагружения образцов сплавов ВЖ175 и ВКНА-1ВР;

- установить зависимости между параметрами упруго-пластического деформирования при «мягком» и «жестком» нагружении сплавов ВКНА-1ВР и ВЖ175;

- разработать метод оценки долговечности деталей из сплавов ВКНА-1ВР и ВЖ175 при произвольном коэффициенте асимметрии цикла при «жестком» и «мягком» нагружении.

Научная новизна диссертационной работы состоит в получении автором следующих результатов:

1. Разработан метод оценки долговечности образцов из сплавов ВЖ175 при 20, 650, 750 °С и ВКНА-1ВР при температурах 20, 850, 1050 °С при произвольном коэффициенте асимметрии цикла при «жестком» и «мягком» нагружении при испытаниях на малоцикловую усталость.

2. Впервые установлена связь механизма разрушения с параметром нагружения (деформация или напряжение), асимметрией цикла нагружения и температурой испытания для образцов из сплавов ВЖ175 при 20, 650, 750 °С и ВКНА-1ВР при 20, 850, 1050 °С;

3. Впервые установлена связь параметров петли упруго-пластического гистерезиса (для «жесткого» цикла: размах пластической деформации, амплитудное и среднее значение напряжения, а также характер их изменения в процессе испытания; для «мягкого» цикла деформация циклической ползучести, амплитудное и среднее значение полной деформации в цикле, а также характер их изменения в процессе испытания) с контролируемым параметром нагружения и асимметрией цикла для сплавов ВЖ175 при 20, 650, 750 °С и ВКНА-1ВР при 20, 850, 1050 °С.

4. Впервые установлено, что симметричное «мягкое» и «жесткое» нагружение эквивалентны для образцов из сплавов ВЖ175 при 20, 650, 750 °С и ВКНА-1ВР при 20, 850, 1050 °С за счет циклической стабильности этих материалов.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

1. Установлена возможность сокращения объема усталостных испытаний (до трехкратного) за счет выявленной эквивалентности испытаний при «мягком» и «жестком» симметричном цикле образцов из сплавов ВЖ175 при 20, 650, 750 °С и ВКНА-1ВР при 20, 850 и 1050 °С.

2. Установленные соответствия между механизмами разрушения и параметрами нагружения позволят определить, какие условия нагружения привели к разрушению детали и соответствовали ли эти условия расчетным.

3. Предложен метод оценки долговечности при произвольной асимметрии цикла, который может быть использован при расчетах ресурса деталей ГТД.

4. Впервые определены характеристики малоциклового усталости новых жаропрочных никелевых сплавов ВКНА-1ВР и ВЖ175, внесены дополнительные сведения в паспорта № 1649 и № 1805.

5. Разработан стандарт организации 1-595-33-456-2014 «Методика испытаний на малоцикловую усталость при «жестком» цикле нагружения жаропрочных сплавов для авиационных ГТД».

Методология и методы исследования

Исследования свойств материалов были проведены с учетом требований отечественных и зарубежных стандартов. Для проведения исследований использованы классические инженерные подходы, основанные на гипотезах и теориях механики разрушения, механики деформируемого твердого тела, материаловедения.

Положения, выносимые на защиту:

– результаты испытаний на малоцикловую усталость сплавов ВЖ175 и ВКНА-1ВР при «мягком» и «жестком» цикле нагружения, при разных асимметриях цикла ($R=0$, $R=-1$, $R=0,5$), температурах испытания (20°С, 650°С и 750°С для ВЖ175; 20°С, 850 °С и 1050 °С для ВКНА-1ВР);

– результаты фрактографического анализа испытанных образцов из сплавов ВЖ175 и ВКНА-1ВР;

– исследование влияния температуры и асимметрии цикла на сопротивление малоциклового усталости образцов из сплавов ВЖ175 и ВКНА-1ВР;

– результат анализа характера упруго-пластического деформирования при различных условиях нагружения образцов из сплавов ВЖ175 и ВКНА-1ВР;

– исследование применимости методов оценки долговечности при произвольном коэффициенте асимметрии цикла образцов из сплавов ВЖ175 и ВКНА-1ВР.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием стандартизованных методов испытаний, метрологически аттестованного, поверенного современного оборудования, статистической обработкой значительного объема экспериментальных данных.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на: 11-ой и 14-ой Всероссийских конференциях по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» (Москва, 2019, 2022); Всероссийской научно-технической конференции «Современные жаропрочные никелевые деформируемые сплавы и технологии их производства» (Москва, 2021).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 работ, включая 2 статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в базе цитирования Scopus; 3 статьи в ведущих научных изданиях, включенных в перечень ВАК при Минобрнауки России.

Структура и объем работы. Диссертация содержит введение, пять глав, заключение, список литературы. Объем диссертации составляет 136 страниц, включая 130 рисунков, 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследований, определены научная новизна и практическая значимость работы, представлены положения, выносимые на защиту, указана апробация результатов работы.

Первая глава диссертации представляет собой литературный обзор. Она состоит из четырех разделов:

В разделе «малоцикловая усталость жаропрочных никелевых сплавов» приведены общие сведения о проблеме разрушения деталей от малоциклового усталости, приведена информация о применении жаропрочных никелевых сплавов в деталях, подверженных малоциклового усталости, а также представлены определяющие соотношения малоциклового усталости: уравнения Басквина-Мэнсона-Коффина, Рэмберга-Осгуда, степенная зависимость долговечности от параметра нагружения (напряжения или деформации).

В разделе «асимметрия цикла нагружения» приведены основные соотношения между параметрами циклического нагружения, в том числе коэффициент асимметрии цикла:

$$R_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{min}}{\varepsilon_{max}}; R_\sigma = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}, \quad (1)$$

где σ – нормальное напряжение вдоль оси нагружения, ε – относительная продольная деформация, а индексами max и min обозначены их минимальное и максимальное значения в цикле соответственно. Также в этом разделе продемонстрировано, как асимметрия цикла нагружения в деталях АГТД меняется в процессе эксплуатации. Приведены методы учета влияния асимметрии цикла на сопротивление малоциклового усталости при оценке долговечности материала.

В разделе, посвященном «мягкому» и «жесткому» нагружению, представлены основные отличительные особенности проведения испытаний на малоцикловую усталость при контроле нагрузки и деформации в цикле, а также приведены выдержки из нормативных документов о выборе режима нагружения.

В каждом из этих трех разделов приведены обзоры отечественных и зарубежных исследований по соответствующим темам. В заключении по первой главе сделаны выводы об актуальности диссертационной работы, основанные на результате литературного обзора.

Во второй главе диссертации приведены объекты и методы исследований.

В качестве объектов исследования выбраны применяемые в авиационной промышленности жаропрочный никелевый деформируемый сплав ВЖ175 и лопаточный литейный интерметаллидный жаропрочный никелевый сплав с равноосной структурой ВКНА-1ВР.

ВЖ175 – жаропрочный деформируемый никелевый сплав, относящийся к классу дисперсно-твердеющих и используемый преимущественно для изготовления дисков газотурбинных двигателей и установок. Он имеет сложную систему легирования (Ni-Co-Cr-W-Mo-Al-Ti-Nb-C). Упрочняется интерметаллидной γ' -фазой сложного состава $[(\text{Ni}, \text{Co}, \text{Cr})_3(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Nb}, \text{Mo}, \text{W}, \text{V})]$ и морфологии: размер частиц первичной γ' -фазы составляет 2-7 мкм, вторичной и третичной, расположенных в прослойках твердого раствора, – от 10 до 700 нм. Количество упрочняющей γ' -фазы достигает 53%. Границы зерен γ -твердого раствора упрочнены мелкодисперсной карбидной (типа (Nb, Ti)C) и боридной (типа $(\text{Mo}, \text{Cr}, \text{W}, \text{Co})_3\text{B}_2$) фазами. На рисунке 1 приведена микроструктура ВЖ175. Свойства кратковременной прочности приведены в таблице 1.

Таблица 1. Механические свойства ВЖ175-ИД

T, °C	E, ГПа	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %	Ψ , %
20	219	1630	1215	14	16
650	178	1560	1100	12	14
750	172	1215	1050	6	9

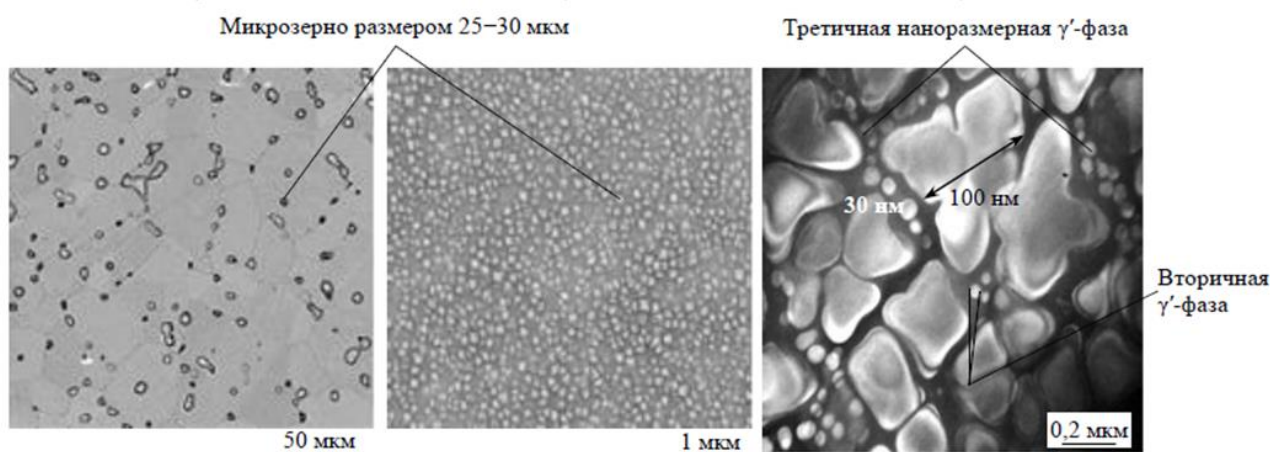


Рисунок 1 – микроструктура сплава ВЖ175

ВКНА-1ВР – литейный жаропрочный интерметаллидный сплав на основе легированного соединения Ni_3Al . Сплав используют для изготовления сопловых лопаток, створок-проставок, элементов камеры сгорания и других деталей горячего тракта газотурбинного двигателя, работающих без защитных жаростойких покрытий в интервале температур от 850 до 1200 °С. Образцы для испытаний на малоцикловую усталость изготовлены из отливок с равноосной структурой, изготовленных методом точного литья в вакууме. В таблице 2 приведены характеристики кратковременной прочности ВКНА-1ВР.

Таблица 2. Механические свойства ВКНА-1ВР

Т, °С	Е, ГПа	σ_b , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %	Ψ , %
20	198	580	360	5,0	8,3
850	143	680	616	4,1	5,4
1050	126	405	360	4,5	6,5

На рисунке 2 представлена микроструктура ВКНА-1ВР. Она имеет дендритно-ячеистое строение. В междендритных областях расположены равномерные участки эвтектики ($\gamma'+\beta$)-фазы, на границе γ -фазы выделяется вторичная γ' -фаза. Оси дендритов состоят из интерметаллида Ni_3Al , разделенного прослойками твердого раствора на основе Ni.

Испытания на малоцикловую усталость проведены на гладких цилиндрических образцах с диаметром рабочей части 5 мм и длиной рабочей части 15 мм на сервогидравлическом универсальном испытательном оборудовании при одноосном нагружении с частотой 1 Гц и синусоидальной формой цикла в соответствии с ГОСТ 25.502, ASTM E647. Контроль полной деформации был осуществлен с помощью высокотемпературного экстензометра с керамическими стержнями. Испытания при «жестком» цикле проведены при регистрации напряжений в течение всего испытания, зарегистрированы петли упруго-пластического гистерезиса. Испытания при «мягком» нагружении проведены с записью деформации.

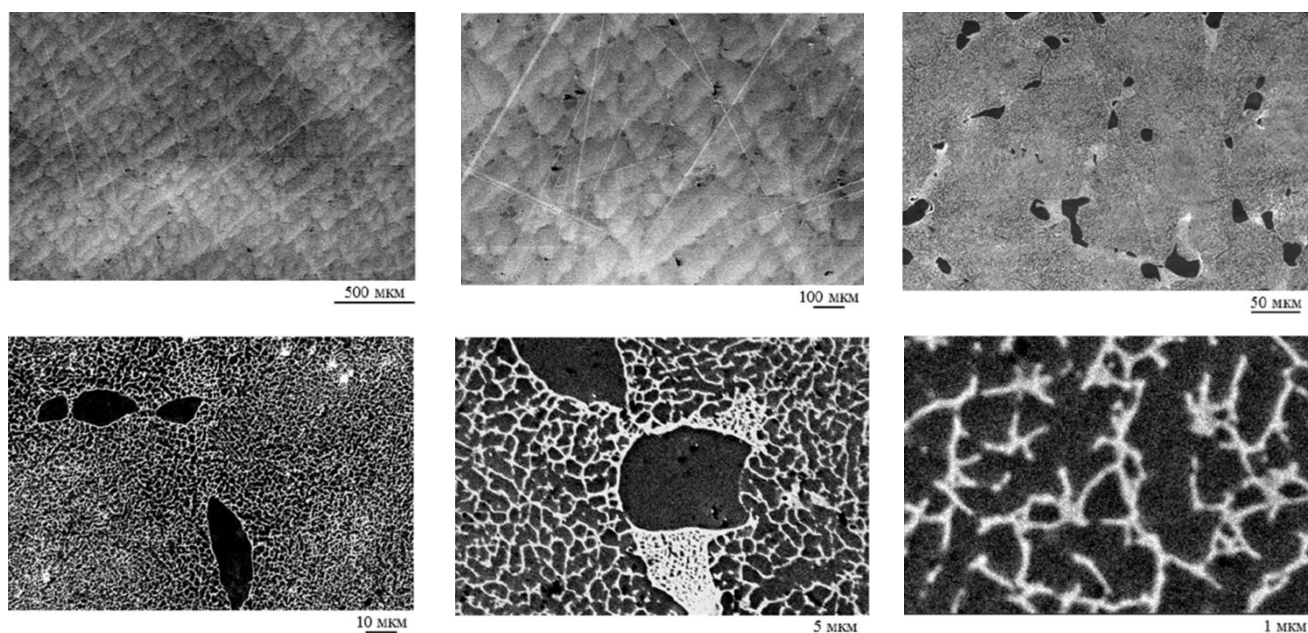
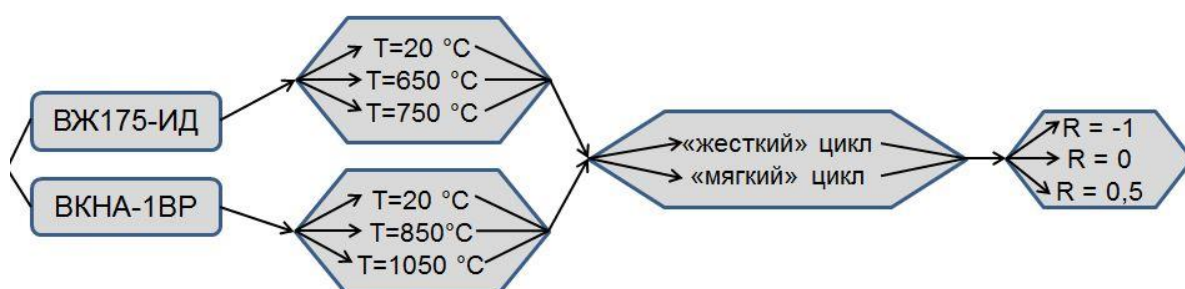


Рисунок 2– микроструктура сплава ВКНА-1ВР

Образцы испытывали при трех температурах для каждого сплава: 20 °С, 650 °С и 750 °С для ВЖ175; 20 °С, 850 °С и 1050 °С для ВКНА-1ВР при трех коэффициентах асимметрии цикла при «мягком» и при «жестком» нагружении, как показано на рисунке 3.



2 сплава x 3 температуры x 2 режима нагружения x 3 коэффициента асимметрии = 36 выборки по 15-20 образцов

Рисунок 3 – схема распределения испытаний по сплавам, температурам, режимам нагружения и коэффициентам асимметрии цикла

Фрактографический анализ изломов проведен с использованием оптического микроскопа. Для фрактографического анализа отобраны образцы сплавов ВЖ175 и ВКНА-1ВР, испытанные при всех возможных сочетаниях температуры, асимметрии цикла и режима нагружения.

В третьей главе приведен анализ результатов фрактографического анализа испытанных образцов сплавов ВЖ175 и ВКНА-1ВР.

В результате фрактографического анализа ВКНА-1ВР установлено, что разрушение развивается по границам дендритов или внутризеренно с формированием вязких ямок по

матрице и фасеток скола по упрочняющей и карбидной фазам. Это наблюдается и при 20 °С, и при 850 °С, и при 1050 °С вне зависимости от режима нагружения и коэффициента асимметрии цикла (рисунок 4). Также следует отметить отсутствие усталостных бороздок на всех исследованных образцах. Единственный наблюдаемый фрактографический признак усталостного разрушения – его очаг – обнаружен примерно на трети исследованных образцов. Наличие или отсутствие выраженного очага усталостного разрушения не зависит от условий нагружения.

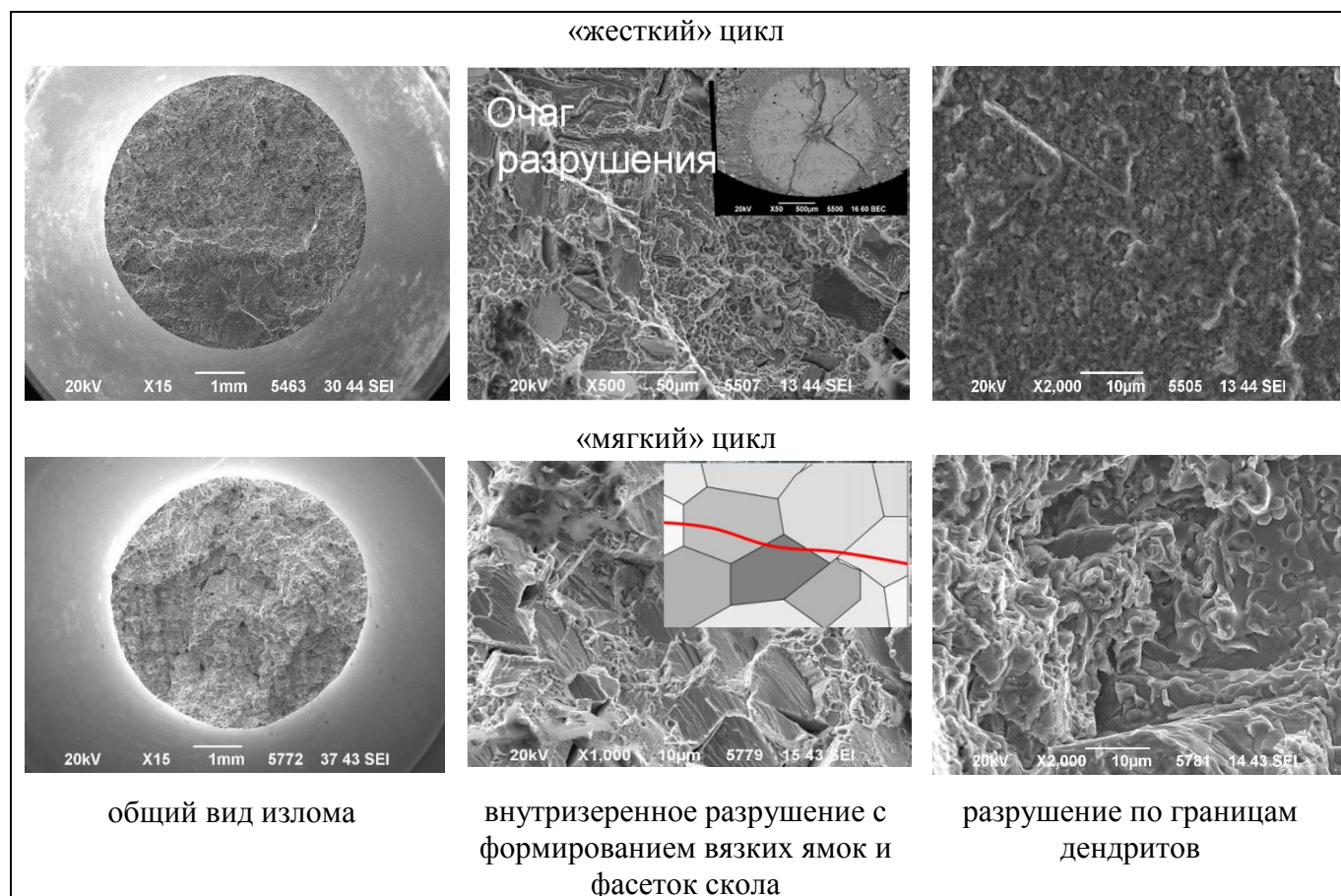


Рисунок 4 – изломы образцов сплава ВКНА-1ВР

При комнатной температуре при «мягком» симметричном и отнулевом циклах нагружения образцов из ВЖ175 усталостное разрушение развивается с формированием усталостных бороздок, а очаг разрушения представлен фасетками скола. Повышение асимметрии цикла нагружения до $R_\sigma=0,5$ приводит к изменению строения зоны усталостного развития трещины на фасетчатый. При 650 °С наблюдения аналогичны, но при высокой асимметрии цикла ($R_\sigma=0,5$) – и очаг, и зона усталостного развития трещины представлены смешанным изломом (межзеренное и внутризеренное с фасетками скола). При 750 °С при симметричном цикле нагружение разрушение развивается от фасеток скола, а зона усталостного развития трещины представлена смешанным изломом. При отнулевом цикле нагружения и очаг и зона усталостного развития трещины представлены смещенным изломом,

а при $R_\sigma=0,5$ – межзеренным разрушением. На одном из исследованных образцов очаг усталостного разрушения расположен под поверхностью, на остальных – вблизи поверхности. Статический долом во всех случаях представлен мелкочапчатым рельефом по вязкой матрице и фасетками скола по карбидной фазе. Изломы испытанных при «мягком» нагружении образцов ВЖ175 представлены на рисунке 5.

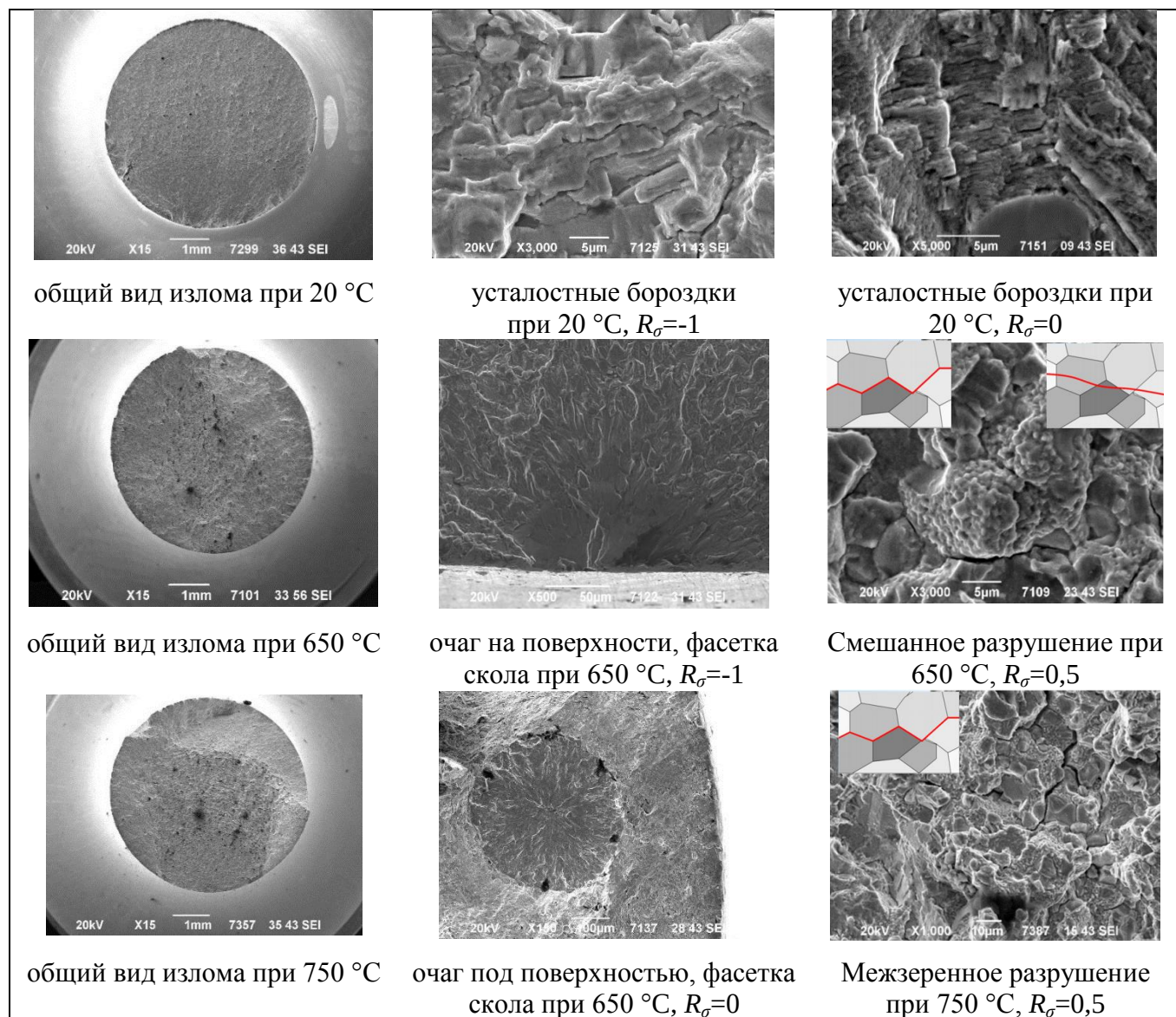


Рисунок 5 – изломы образцов сплава ВЖ175 при «мягком» нагружении

Результаты фрактографических исследований образцов из сплава ВЖ175, испытанных при «жестком» цикле разрушения при различной температуре и коэффициентах асимметрии цикла нагружения, показали, что при комнатной температуре при симметричном цикле нагружения усталостное разрушение развивается с формированием усталостных бороздок, а очаг разрушения представлен фасетками скола. Повышение асимметрии цикла нагружения до $R_\sigma=0,5$ приводит к появлению в зоне усталостного развития трещины участков с фасетчатым рельефом на фоне бороздчатого.

При 650 °С наблюдаемый очаг разрушения вне зависимости от асимметрии цикла представлен фасетками скола, а зоны усталостного развития трещины представлены усталостными бороздками при симметричном цикле нагружения и смешанным изломом (межзеренное и внутризеренное с усталостными бороздками) – при асимметричном.

При 750 °С вне зависимости от асимметрии цикла нагружения разрушение развивается от фасеток скола, а зона усталостного развития трещины представлена межзеренным изломом.

Изломы испытанных при «жестком» нагружении образцов ВЖ175 представлены на рисунке 6.

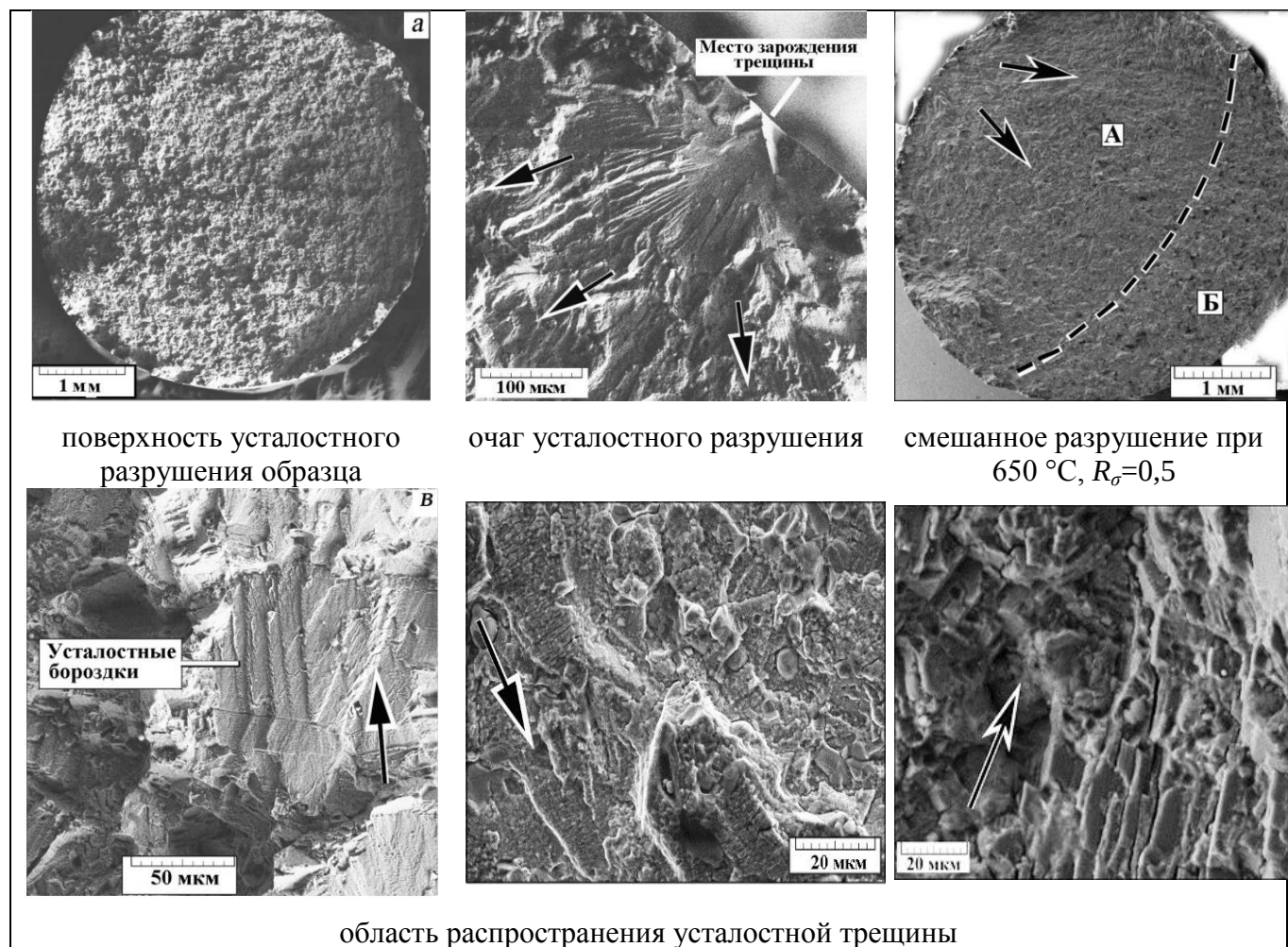


Рисунок 6 – изломы образцов сплава ВЖ175 при «жестком» нагружении

В четвертой главе представлен анализ результатов испытаний на малоцикловую усталость.

Зависимости числа циклов до разрушения от параметра нагружения аппроксимированы степенным уравнением:

$$N_f = aP^b;$$

$$\log_{10}(N_f) = b \cdot \log_{10}P + \log_{10}a, \quad (2)$$

где N_f – количество циклов до разрушения; P – параметр нагружения, в качестве которого обычно принимают амплитуду, размах или максимальное значение напряжения или деформации в цикле; a и b – константы.

На рисунках 7 и 8 представлены кривые усталости для сплавов ВКНА-1ВР и ВЖ175 соответственно в двойных логарифмических координатах. Для испытаний при «жестком» цикле параметр P из уравнения (2) – амплитуда деформации ε_a , для испытаний при «мягком» цикле – амплитуда напряжения σ_a . Константы уравнения (2) определены методом наименьших квадратов с использованием регрессионного анализа. При этом была принята гипотеза о нормальности распределения долговечности на каждом уровне нагружения, что характерно для исследуемого явления – малоциклового усталости металлов.

Определены параметры петель упруго-пластического гистерезиса при «жестком» нагружении: амплитуда напряжений, среднее напряжение, размах пластической деформации (ширина петли упруго-пластического гистерезиса). Оба сплава циклически стабильны – амплитуда напряжения сохраняется на протяжении испытания. Среднее напряжение при несимметричном цикле либо остается постоянным, либо снижается с постоянной скоростью, как показано на рисунке 9.

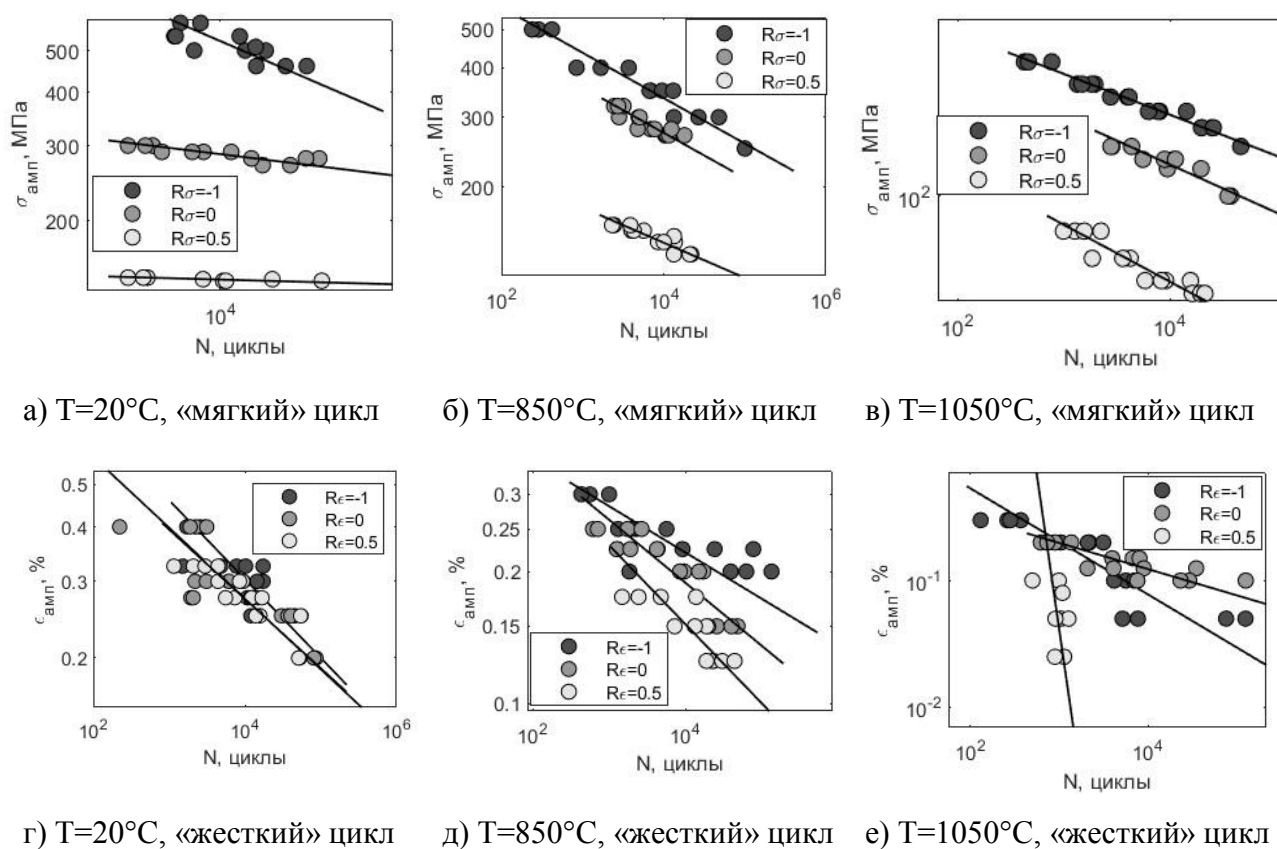


Рисунок 7 – кривые усталости ВКНА-1ВР

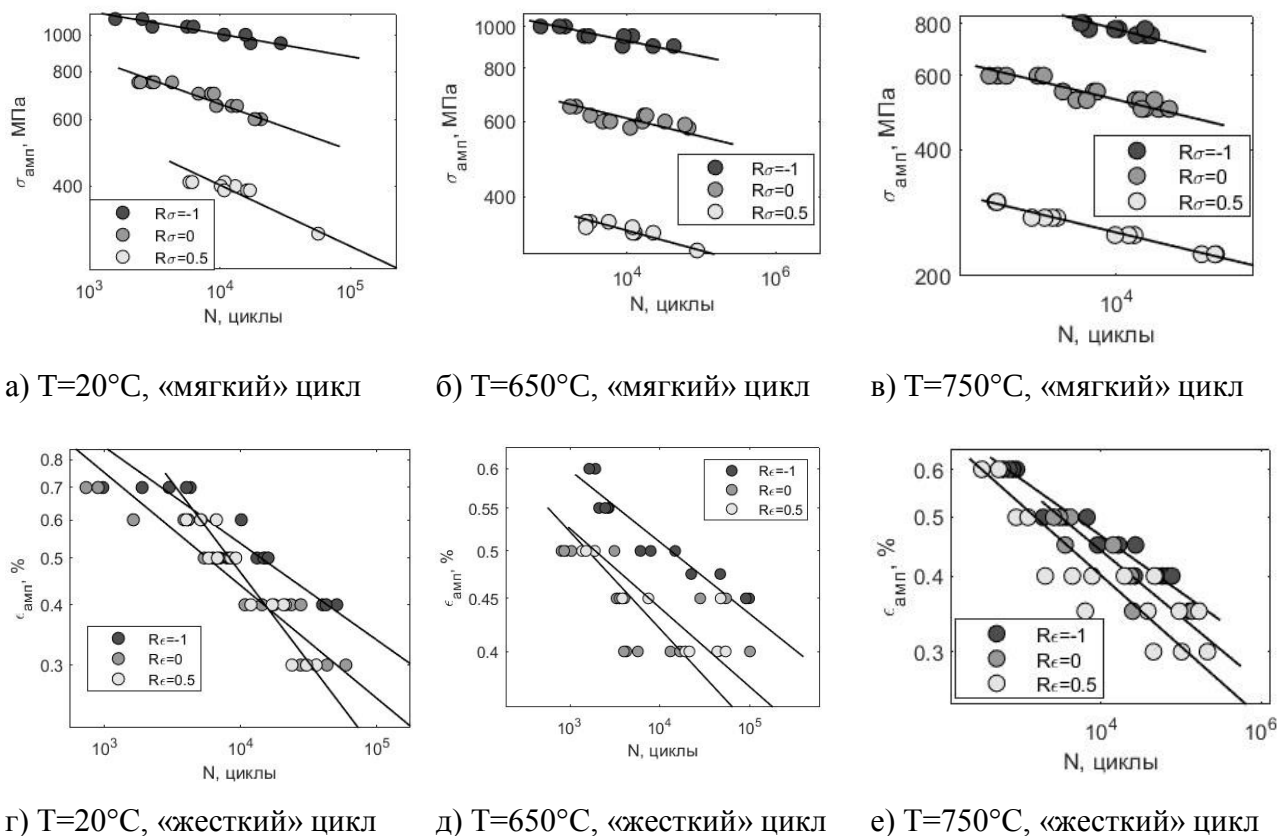


Рисунок 8 – кривые усталости ВЖ175

При «мягком» нагружении при повышенной температуре и асимметричном цикле нагружения для обоих сплавов наблюдается циклическая ползучесть, пример зависимости деформации от числа циклов приведен на рисунке 10. При большой асимметрии и больших нагрузках этот процесс более интенсивен. Наблюдается три выраженные стадии: замедленной, установившейся и ускоренной ползучести. При симметричном же нагружении или при комнатной температуре средняя деформация в цикле существенно не меняется, циклическая ползучесть не наблюдается.

Выявлена связь между условиями асимметрией цикла и характером разрушения ВЖ175 при «мягком» цикле при повышенной температуре. При повышении асимметрии цикла механизм разрушения переходит от типичного для усталостного бороздчатого к типичному для статической ползучести фасеточному межзеренному и внутризеренному, как показано на рисунке 11.

При симметричном цикле нагружения для обоих сплавов неконтролируемый параметр (напряжение или деформация) значительно не меняется на протяжении испытания. По результатам «жесткого» нагружения можно прогнозировать долговечность при «мягком» нагружении и наоборот. Результаты при «мягком» и «жестком» нагружении при симметричном нагружении могут быть включены в одну выборку, как показано на рисунке 12.

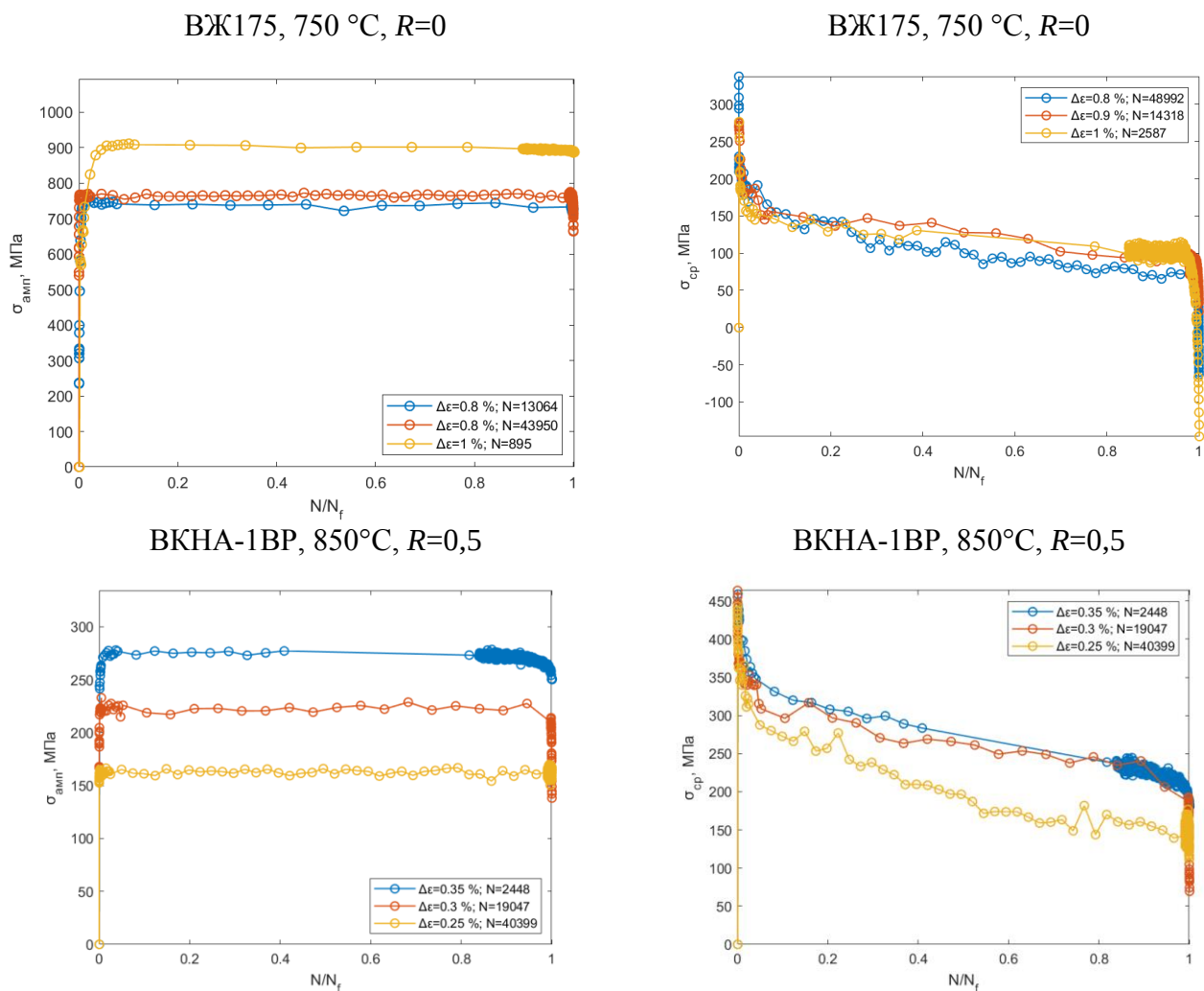


Рисунок 9 – среднее и амплитудное напряжения в цикле

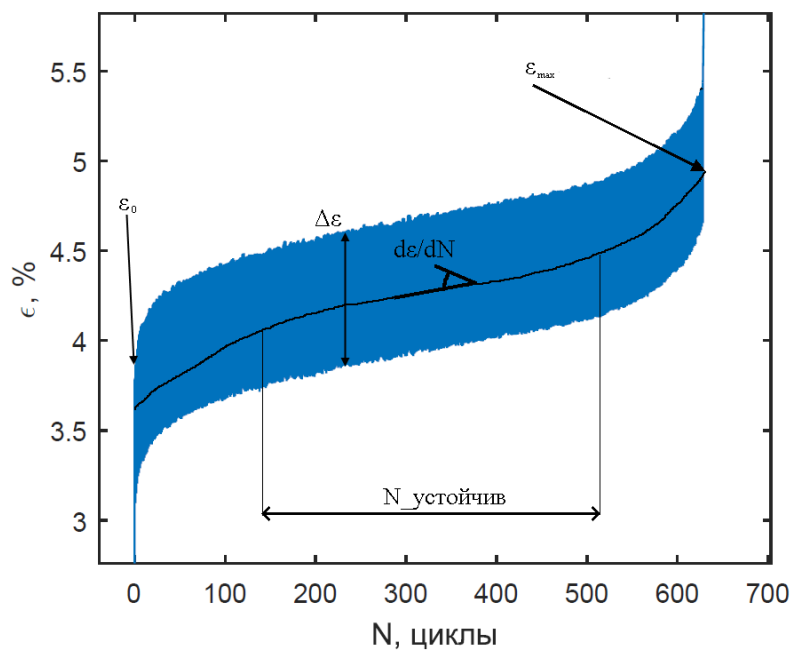


Рисунок 10 – развитие деформации в цикле образца из ВЖ175 при «мягком» нагружении, $T=750\text{ }^{\circ}\text{C}$; $R_{\sigma}=0$; $\sigma_{max} = 1200\text{ МПа}$

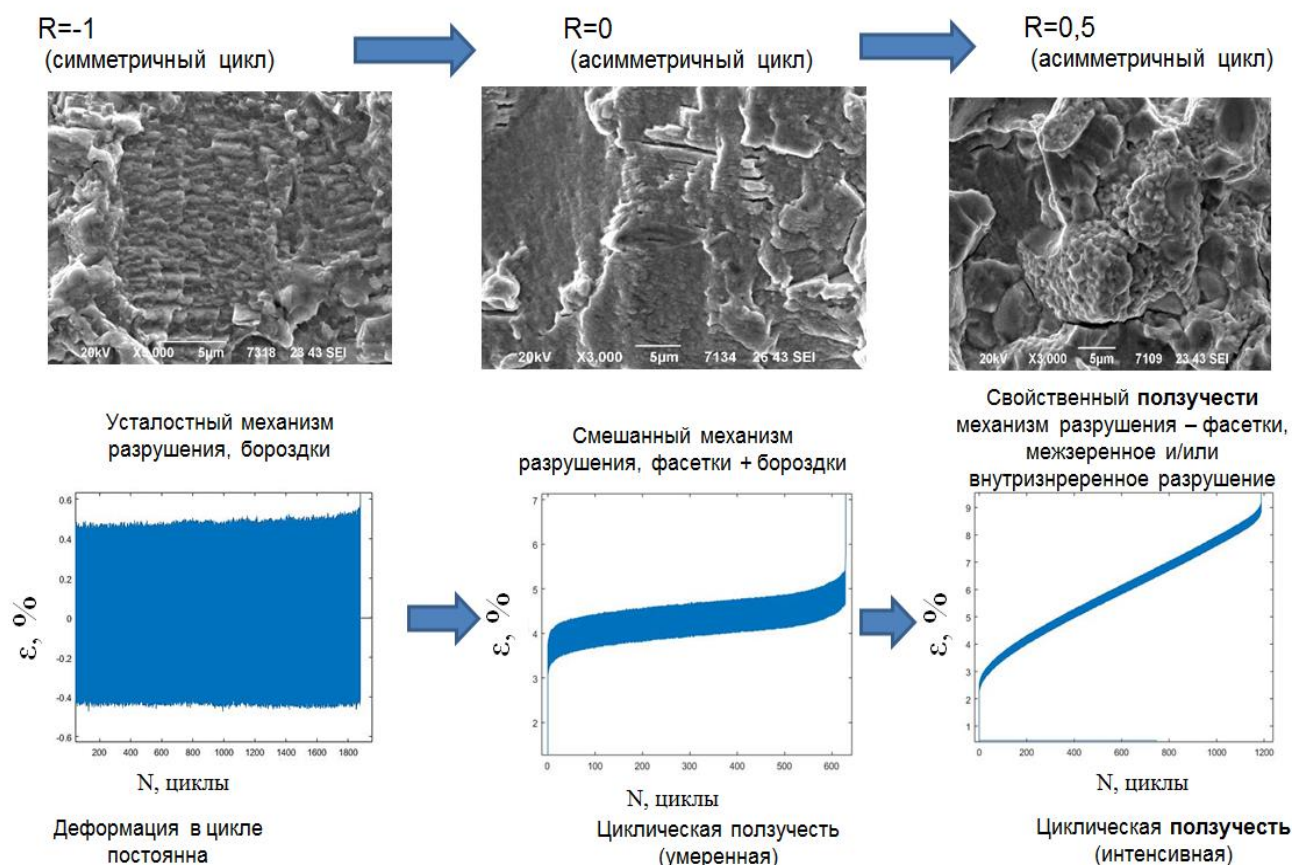


Рисунок 11 – зависимость механизма разрушения от асимметрии «мягкого» цикла нагружения

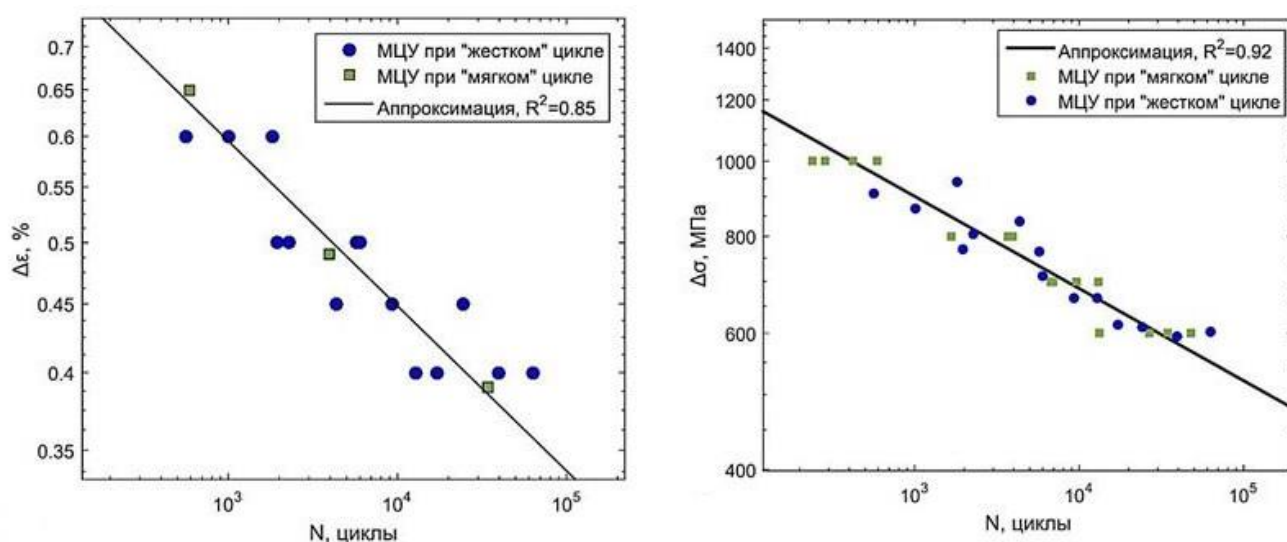


Рисунок 12 – результаты испытаний сплава ВКНА-1ВР при 850 °С при $R=-1$

В пятой главе исследована применимость к полученным результатам основанных на силовом подходе моделей оценки долговечности при произвольной асимметрии цикла при «мягком» и «жестком» нагружении.

Для выбора модели, позволяющей оценить долговечность при произвольном коэффициенте асимметрии при нагружении, можно использовать силовой, деформационный

или энергетический подход. В первом случае долговечность зависит от напряжения в цикле, во втором – от деформации, в третьем – и от деформации, и от напряжения. Одна из задач работы – определить, можно ли с использованием какого-либо параметра нагружения оценить долговечность одновременно и при «мягком», и при «жестком» нагружении. В настоящей работе исследована применимость моделей, основанных исключительно на силовом подходе, т.е. моделей, в которых при «мягком» цикле долговечность зависит от задаваемого напряжения, а при «жестком» – от характерного зарегистрированного напряжения, а именно, напряжения на стабильном срединном цикле.

Силовой подход имеет очевидный недостаток – в уравнениях в явном виде не фигурируют пластические деформации, являющиеся одним из основных повреждающих факторов при малоциклового усталости. Однако у силового подхода есть и преимущества. В настоящей работе выбран силовой подход по следующим причинам:

1) Исследуемые сплавы циклически стабильны – при «жестком» цикле нагружения амплитуда напряжения в процессе испытания меняется незначительно. Характер изменения среднего напряжения цикла зависит от условий испытаний, но напряжение на срединном цикле можно использовать как характерное, так как оно не изменяется интенсивно на протяжении большей части испытания. Типовой пример развития среднего и амплитудного напряжений показан на рисунке 13.

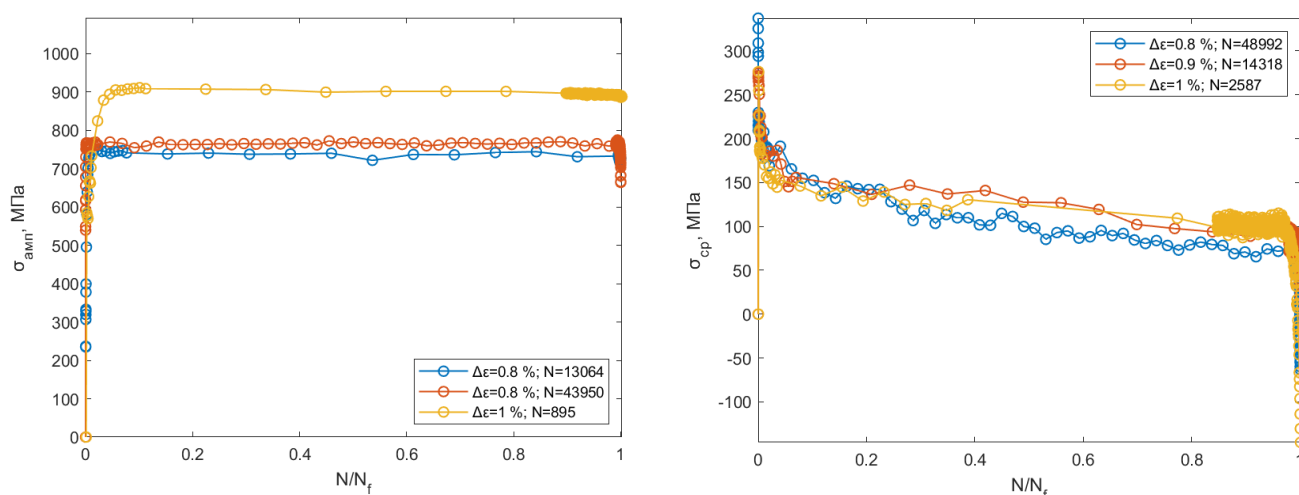


Рисунок 13 – амплитудные и средние напряжение в цикле образцов из ВЖ175 при $R\epsilon=0$, $T=750$ °С.

2) При этом изменение неконтролируемого параметра при «мягком» нагружении – деформации в цикле – характеризуется множеством параметров, как показано на рисунке 10: размах деформации $\Delta\epsilon$, начальная деформация ϵ_0 , накопленная деформация циклической ползучести $\epsilon_{\max}$, длительность стадии установившейся циклической ползучести $N_{уст}$, скорость

накопления деформации циклической ползучести на этом участке $d\varepsilon/dN$. Большое количество параметров, которые могут оказывать влияние на долговечность, делает использование деформационного и энергетического подходов затруднительным.

3) При «жестком» нагружении для одного из двух исследуемых сплавов – ВКНА-1ВР – изменение размаха пластической деформации специфично – ее пики либо отсутствуют, либо приходится на первые и последние циклы, как показано на рисунке 14. Обычно в качестве характерного значения пластической деформации выбирают значение на срединном цикле, но для ВКНА-1ВР такой подход не корректен. Это делает применение деформационного подхода затруднительным.

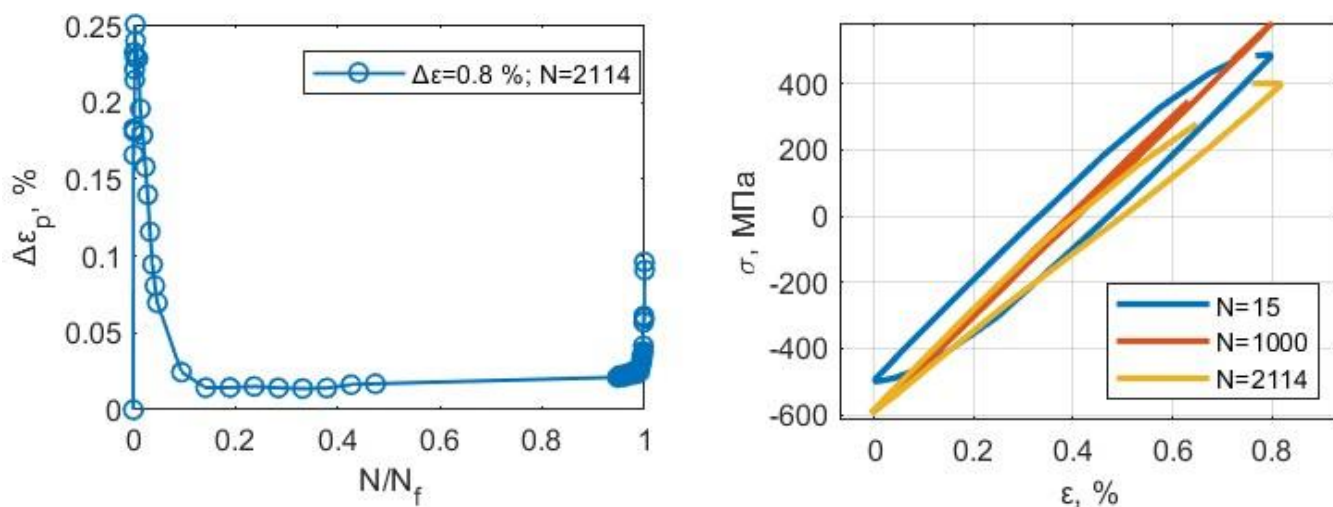


Рисунок 14 – изменение пластической деформации в цикле (слева) и развитие петель упруго-пластического гистерезиса (справа) образца из ВКНА-1ВР при $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $R_\varepsilon=-1$

4) При «жестком» цикле обычно регистрируют нагрузку в соответствии с требованиями стандартов на испытания на малоцикловую усталость, тогда как при «мягком» нагружении запись деформации факультативна. В связи с этим охват области применения силового подхода шире, чем деформационного и энергетического.

В таблице 3 приведены рассмотренные силовые модели, соответствующие им параметры нагружения $P=\sigma_{\text{экв}}$, а также уравнения для оценки долговечности при произвольной асимметрии цикла при «мягком» или «жестком» нагружении. Используются следующие обозначения:

σ_σ – предел прочности;

σ_{cp} – среднее напряжение цикла;

σ_a – амплитуда напряжения цикла;

σ_{max} – максимальное напряжения цикла;

a, b, α, γ, n – параметры уравнений, определяемые экспериментально.

Таблица 3 – Выражения для эквивалентного напряжения и соответствующие им уравнения для оценки долговечности

Название	Выражение
Модели с двумя регрессионными параметрами (a, b)	
Модель Гудмана	$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_{\text{CP}}}{\sigma_B}}; \quad N = a \cdot \left(\frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_{\text{CP}}}{\sigma_B}} \right)^b \quad (3)$
Модель Гербера	$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sigma_a}{1 - \left(\frac{\sigma_{\text{CP}}}{\sigma_B} \right)^2}; \quad N = a \cdot \left(\frac{\sigma_a}{1 - \left(\frac{\sigma_{\text{CP}}}{\sigma_B} \right)^2} \right)^b \quad (4)$
Модель Смита-Уотсона-Топпера	$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\sigma_a \cdot \sigma_{\text{CP}}}; \quad N = a \cdot \left(\sqrt{\sigma_a \cdot \sigma_{\text{max}}} \right)^b \quad (5)$
Модель Марина	$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sigma_a}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_{\text{CP}}}{\sigma_B} \right)^2}}; \quad N = a \cdot \left(\frac{\sigma_a}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_{\text{CP}}}{\sigma_B} \right)^2}} \right)^b \quad (6)$
Модели с тремя регрессионными параметрами (a, b, $\alpha/\gamma/n$)	
Модель Квофи	$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sigma_a}{e^{-\alpha \frac{\sigma_{\text{CP}}}{\sigma_B}}}; \quad N = a \cdot \left(\frac{\sigma_a}{e^{-\alpha \frac{\sigma_{\text{CP}}}{\sigma_B}}} \right)^b \quad (7)$
Модель Уокера	$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sigma_a^\gamma \cdot \sigma_{\text{max}}^{1-\gamma}; \quad N = a \cdot (\sigma_a^\gamma \cdot \sigma_{\text{max}}^{1-\gamma})^b \quad (8)$
Модель типа Гудмана-Гербера	$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sigma_a}{1 - \left(\frac{\sigma_{\text{CP}}}{\sigma_B} \right)^n}; \quad N = a \cdot \left(\frac{\sigma_a}{1 - \left(\frac{\sigma_{\text{CP}}}{\sigma_B} \right)^n} \right)^b \quad (9)$

Для моделей с двумя параметрами из таблицы 3 определены эквивалентные напряжения для каждого испытанного образца. Для «мягкого» цикла они выражены через контролируемые среднее и амплитудное напряжения цикла. Для «жесткого» же цикла среднее и амплитудное напряжение были определены на срединном цикле $N_f/2$. Таким образом, было получено по шесть обобщенных выборок для каждой модели: ВЖ175 при 20°C, ВЖ175 при 650°C, ВЖ175 при 750°C, ВКНА-1ВР при 20°C, ВКНА-1ВР при 850°C, ВКНА-1ВР при 1050°C. В каждой из этих выборок были объединены результаты испытаний, полученные при трех коэффициентах асимметрии при «мягком» и при «жестком» нагружении.

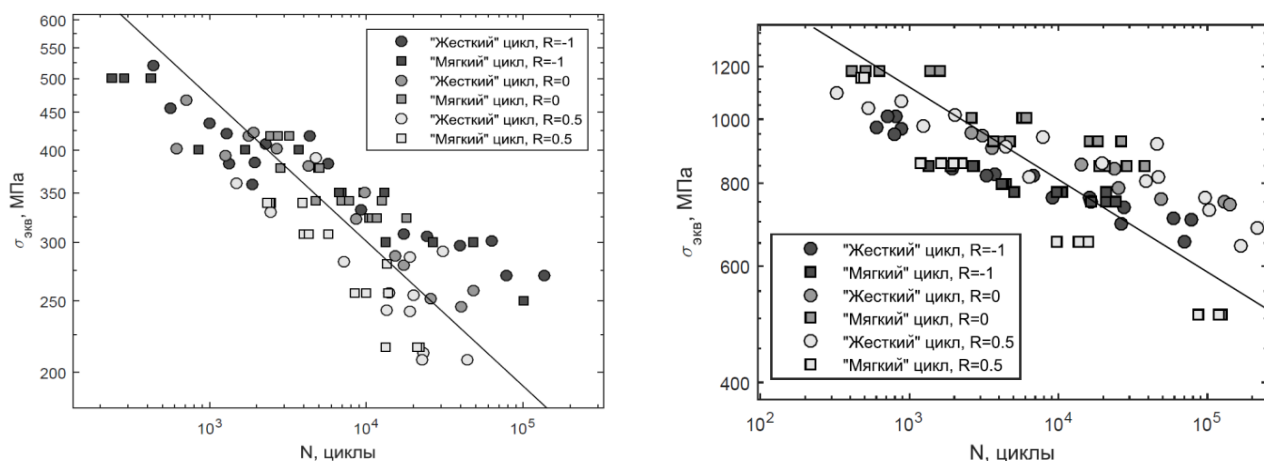
В качестве критерия соответствия уравнений (2)-(9) результатам испытаний выбран коэффициент детерминации R^2 :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (10)$$

где y_i – фактическое значение зависимой переменной, $\hat{y}_i$ – расчетное значение зависимой переменной, $\bar{y}$ – среднее значение зависимой переменной, n – количество пар значений

зависимой и независимой переменных. Для уравнения (2) зависимой переменной является логарифм числа циклов до разрушения, независимой – логарифм параметра нагружения.

Ни одна из рассмотренных моделей не может быть применима для корректной оценки долговечности при произвольных условиях нагружения одновременно при всех рассмотренных температурах и для обоих сплавов. Однако для отдельных обобщенных выборок найдены удовлетворительно подходящие модели с двумя регрессионными параметрами, примеры на рисунке 15:



ВКНА-1ВР, 850 °С, модель Гербера

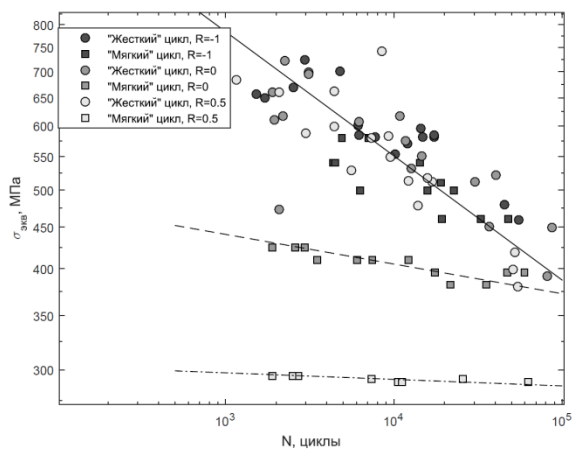
ВЖ175, 750 °С, модель Гудмана

Рисунок 15 – обобщенные кривые усталости при «мягком» и «жестком» нагружении при произвольной асимметрии цикла

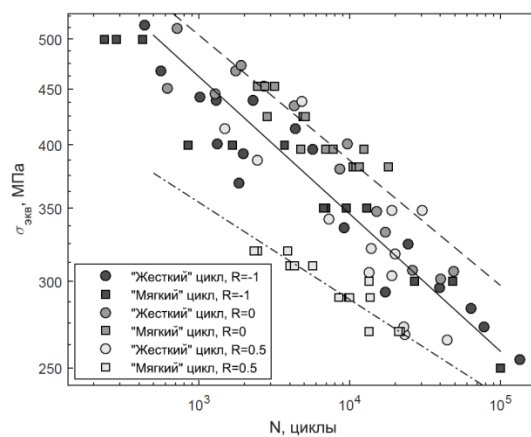
Одна из моделей – модель Смитта-Уотсона-Топпера – подходит для обобщения выборок результатов испытаний при «жестком» цикле при всех трех коэффициентах асимметрии. Кроме того, по полученным кривым можно прогнозировать и результаты испытаний при «мягком» симметричном цикле нагружения. Это наблюдается для обоих сплавов для всех трех температур (рисунок 16):

Для «мягкого» же нагружения не найдено моделей с двумя регрессионными параметрами, с помощью которых можно было бы корректно оценить ожидаемую долговечность при произвольном коэффициенте асимметрии. Был выполнен анализ применимости моделей с тремя регрессионными параметрами и выбор наиболее корректной из них в соответствии с блок-схемой (рисунок 17):

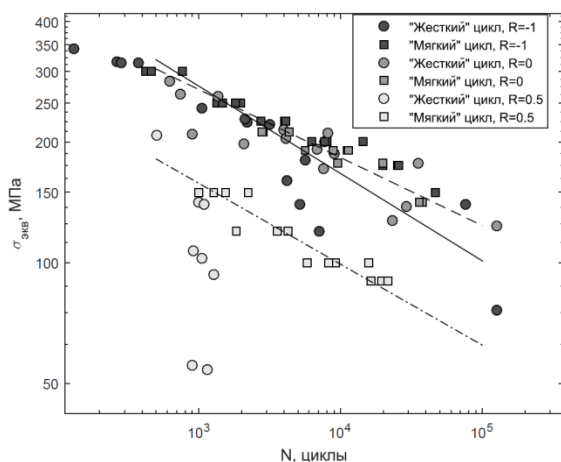
Для образцов из сплава ВЖ175 при 650 °С и 750 °С и образцов из сплава ВКНА-1ВР при 20 °С и 850 °С наибольшего соответствия экспериментальных данных описывающему их уравнению (наибольшего коэффициента детерминации R^2) удалось достичь с использованием модели типа Гудмана-Гербера, а для ВЖ175 при 20°С и ВКНА-1ВР при 1050 °С - с использованием модели Уокера. Примеры обобщенных кривых усталости, построенных по этим моделям, приведены на рисунке 18.



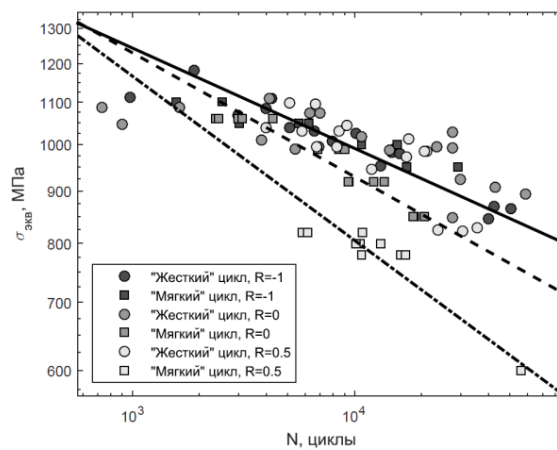
а) ВКНА-1ВР, 20°C



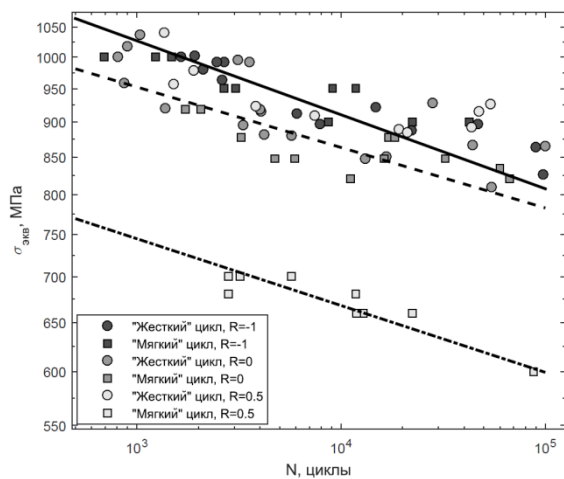
б) ВКНА-1ВР, 850°C



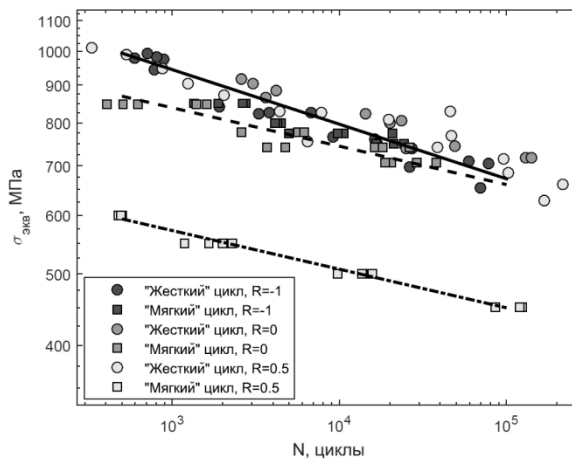
в) ВКНА-1ВР, 1050°C



г) ВЖ175, 20°C



д) ВЖ175, 650°C



е) ВЖ175, 750°C

Рисунок 16 – обобщенные кривые усталости по модели Смитта-Уотсона-Топпера. Сплошная линия – линия регрессии для обобщенной выборки «жесткого» цикла при $R_\varepsilon=-1$, $R_\varepsilon=0$, $R_\varepsilon=0.5$ и «мягкого» цикла при $R_\sigma=-1$; пунктирная линия – «мягкий» цикл при $R_\sigma=0$; штрихпунктирная линия – «мягкий» цикл при $R_\sigma=0.5$

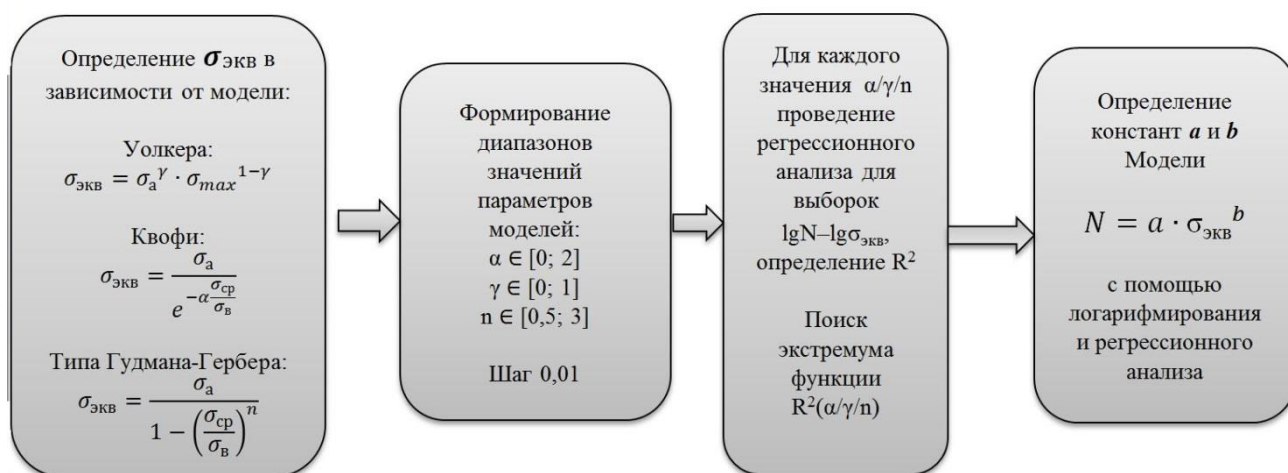
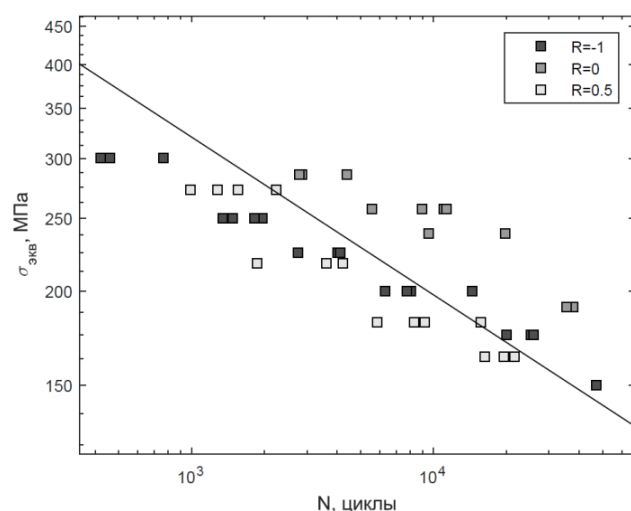
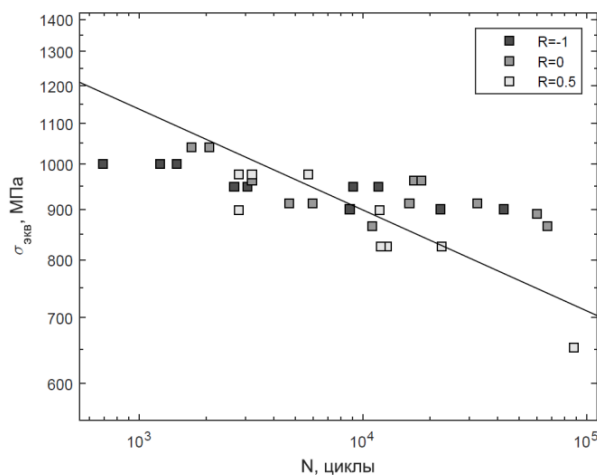


Рисунок 17 – алгоритм выбора модели оценки долговечности и определения ее параметров.



ВКНА-1ВР, 1050°С. Модель Уокера



ВЖ175, 650°С. Модель типа Гудмана-Герберга

Рисунок 18 – обобщенные кривые усталости при «мягком» нагружении

Результаты исследования сведены в единую блок-схему (рисунок 19) показывающую, для каких выборок исследованных сплавов какие модели оценки долговечности при произвольном коэффициенте асимметрии предпочтительны. В ней также приведены численные значения параметров моделей и относительные коэффициенты детерминации – $R^2_{\text{отн}}$, представляющих собой отношение коэффициента детерминации для данных $\lg N - \lg \sigma_{\text{экв}}$, к средним коэффициентам детерминации исходных выборок:

$$R^2_{\text{отн}} = \frac{R^2_{\text{модели}}}{R^2_{\text{ср.}}} \quad (11)$$

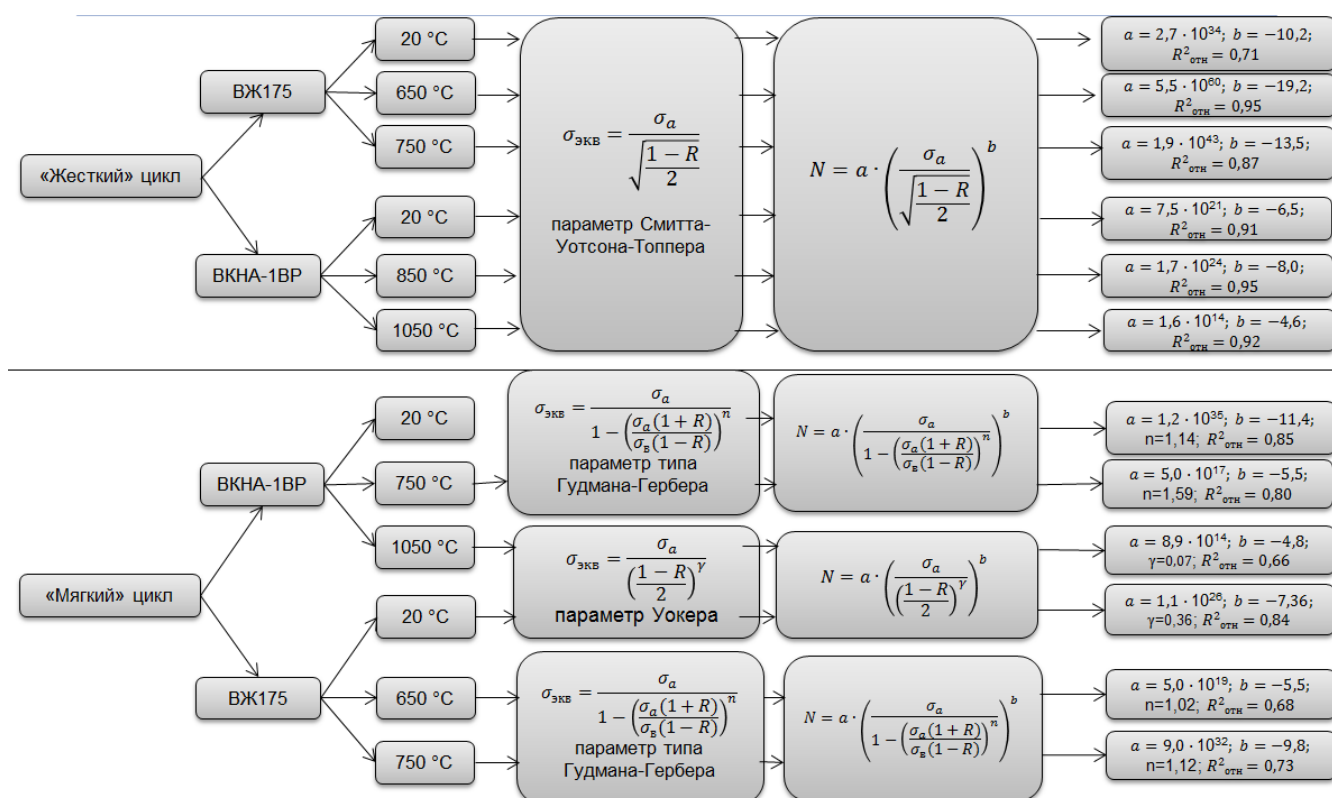


Рисунок 19 – алгоритм оценки долговечности образцов ВЖ175 и ВКНА-1ВР при произвольном коэффициенте асимметрии цикла нагружения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы получены следующие результаты:

1. Исследовано влияние асимметрии цикла и температуры испытаний на сопротивление малоциклового усталости ВЖ175 и ВКНА-1ВР. Для обоих сплавов асимметрия цикла при «жестком» нагружении вызывает большее снижение долговечности, чем при «мягком». Повышение температуры от комнатной до рабочей незначительно снижает сопротивление усталости ВЖ175 и более существенно для ВКНА-1ВР.

2. Установлена связь между параметрами нагружения и механизмами разрушения. Повышение температуры испытаний ВЖ175 от 20 до 750 °C и R от -1 до 0,5 приводит к изменению строения очага усталостного разрушения от фасеток скола, к смещенному и далее к межзеренному, а зоны усталостного развития трещины от усталостных бороздок, к фасеткам скола, а далее к смещенному и межзеренному разрушению. ВКНА-1ВР вне зависимости от условий нагружения разрушается по границам дендритов либо внутризеренно с формированием вязких ямок по матрице и фасеток скола по упрочняющей и карбидной фазам без образования усталостных бороздок. При этом вне зависимости от условий нагружения для части образцов затруднительно идентифицировать очаг усталостного разрушения.

3. Установлена взаимосвязь параметров упруго-пластического деформирования при «мягком» и «жестком» нагружении. При «жестком» оба сплава циклически стабильны, а

пластические деформации малы по сравнению с упругими на всем диапазоне долговечностей. При асимметричном мягком нагружении при повышенных температурах у обоих сплавов наблюдается циклическая ползучесть с выраженной стадийностью. При симметричном цикле «мягкое» и «жесткое» нагружение почти эквивалентно при всех температурах для обоих сплавов.

4. Разработан алгоритм оценки долговечности ВЖ175 при температурах 20, 650 и 750 °С и ВКНА-1ВР при 20, 850, 1050 °С при произвольном коэффициенте асимметрии цикла при «мягком» и «жестком» нагружении при рассмотренных температурах с использованием моделей Гудмана, Гербера, Смита-Уотсона-Топпера, Уокера и предложенной в настоящей работе модели на основе моделей Гудмана и Гербера.

Содержание диссертации изложено в следующих работах:

Список основных трудов по теме диссертации опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

1. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Монин С.А. Влияние среднего напряжения цикла на характеристики малоциклового усталости жаропрочного никелевого сплава // Авиационные материалы и технологии. – 2023. – №1(70). – С. 126-136. DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-126-136.

2. Ходинев И.А., Горбовец М.А., Монин С.А., Рыжков П.В. Исследование характеристик малоциклового усталости жаропрочного деформируемого сплава ВЖ175 // Труды ВИАМ. – 2022. – №1(107). – С. 97-110. DOI: 10/18577/2307-6046-2022-0-1-97-110.

3. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Рыжков П.В. Оборудование для проведения испытаний на малоцикловую усталость при «жестком» цикле нагружения // Труды ВИАМ. – 2018. – № 9. – С. 51-60. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-51-60.

Публикации, индексируемые в базе Scopus:

1. Gorbovets M.A., Khodinev I.A., Belyaev M.S., Ryzhkov P.V. Low-cycle fatigue of a VZH175 nickel superalloy during asymmetric loading // Russian Metallurgy (Metally). 2019, – №9, – P. 889-893. DOI:10.1134/S0036029519090039.

2. Gorbovets M.A., Khodinev I.A., Belyaev M.S., Letnikov M.N. Low-cycle fatigue of a VZH175 nickel superalloy at symmetric and asymmetric deformation // Inorganic materials: applied research. 2019, – №4, – P. 846-852. DOI: 10.1134/S207511331904154.

Публикации в других изданиях:

1. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Беляев М.С., Рыжков П.В. Малоцикловая усталость жаропрочного сплава ВЖ175 при асимметричном нагружении // Металлы. – 2019. – №5. – С. 57-62.

2. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Беляев М.С., Летников М.Н. Малоцикловая усталость жаропрочного сплава ВЖ175 при симметричном и асимметричном деформировании // Материаловедение. – 2018. – №1. – С. 3-9.

3. Горбовец М.А., Беляев М.С., Ходинев И.А., Лукьянова М.И. Исследование малоциклового усталости жаропрочных сплавов при «жестком» цикле нагружения // Цветные металлы. – 2017. – № 2. – С. 91-95.

4. Ходинев И.А. Исследование влияния коэффициента асимметрии цикла на малоцикловую усталость жаропрочного никелевого сплава ВЖ175 / Ходинев И.А., Горбовец М.А., Монин С.А. // Материалы XIV Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат». – М., Изд-во: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». – 2022. – С. 9-22.

5. Ходинев И.А. Исследование характеристик малоциклового усталости жаропрочного никелевого сплава ВКНА 1-ВР / Ходинев И.А., Горбовец М.А., Монин С.А. // Материалы XIV Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат». – М., Изд-во: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». – 2022. – С. 41-64.

6. Ходинев И.А. Исследование характеристик малоциклового усталости жаропрочного деформируемого сплава ВЖ175/ Ходинев И.А., Горбовец М.А., Монин С.А., Рыжков П.В. // Материалы Всероссийской конференции «Современные жаропрочные никелевые деформируемые сплавы и технологии их производства». — М., Изд-во: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». – 2021. – С. 99-121.

7. Ходинев И.А. Влияние температуры испытания и асимметрии цикла на МЦУ при заданной деформации жаропрочного сплава ВЖ175 / Горбовец М.А., Ходинев И.А., Беляев М.С., Летников М.Н.// Материалы XI Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат». – М., Изд-во: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». – 2019. – С. 90-106.