

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Ходинева Ивана Александровича
«**Закономерности изменения характеристик малоцикловой усталости жаропрочных никелевых сплавов ВЖ175 и ВКНА-1ВР**», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.17. *Материаловедение*.

Актуальность темы диссертации

Жаропрочные никелевые сплавы входят в число основных материалов для изготовления лопаток и дисков газотурбинных двигателей. При изготовлении лопаток широко применяются методы точного литья, например, литье методом направленной кристаллизации, позволяющее существенно повысить жаропрочные характеристики литейных сплавов, а для изготовления дисков турбин высокого давления используют деформируемые жаропрочные сплавы. В обоих случаях надежность отдельных элементов конструкции газотурбинных двигателей и всего двигателя в целом зависит от уровня длительной и усталостной прочности сплава при эксплуатационных температурах. При этом ресурс работы двигателя устанавливается на основе использования банка данных по конструкционной прочности (прежде всего малоцикловой усталости) используемых сплавов, а также расчетов напряженно-деформированного состояния элементов конструкции и многих других факторов. Переоценить важность проведения усталостных испытаний в данном случае невозможно. Однако наиболее распространенные методики проведения таких испытаний не могут в полной мере отражать механическое поведение сплава в реальных эксплуатационных условиях. Это приводит к необходимости или увеличения объема усталостных испытаний с варьированием способа циклического нагружения или привлечения дополнительных методов математической обработки полученных экспериментальных результатов.

В этой связи диссертационная работа Ходинева Ивана Александровича, посвященная установлению закономерностей влияния характеристик цикла нагружения при контроле напряжений (мягкая схема) и деформаций (жесткая схема) на механизмы разрушения и малоцикловую усталостную долговечность литейного жаропрочного сплава ВКНА-1ВР на основе легированного соединения Ni_3Al , а также деформируемого дисперсно-твердеющего жаропрочного сплава ВЖ175, безусловно, является актуальной,

а ее результаты вносят научный и практический вклад в развитие материаловедения никелевых сплавов.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация Ходинева Ивана Александровича состоит из введения, пяти глав, заключения по работе и списка использованных литературных источников, включающего 123 наименования. Работа изложена на 136 страницах, содержит 130 рисунков и 17 таблиц.

Во введении описана актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, описаны научная новизна и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, апробация работы, а также указаны публикации по теме проведенных исследований.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы по теме диссертационной работы. Дано краткое описание проблемы малоциклового усталостного разрушения высоконагруженных деталей из жаропрочных никелевых сплавов в газотурбинных двигателях. Приведено уравнение Басквина-Мэнсона-Коффина, связывающие долговечность и амплитуду деформации в цикле при малоцикловой усталости, а также уравнение Рэмберга-Осгуда, связывающее амплитуду деформации с амплитудой напряжения при циклическом нагружении. Описаны эмпирические методы учета влияния коэффициента асимметрии цикла на предел выносливости материала по Гудману, Герберу и Содербергу. Обсуждены результаты исследований малоцикловой усталости жаропрочных никелевых сплавов. Проведен обзор современных нормативных документов, регламентирующих методики испытаний материалов на малоцикловую усталость. В заключении по первой главе подчеркнута публикационная активность по теме диссертации в ведущих научных журналах, что подтверждает ее актуальность.

Во второй главе обсуждены материалы и методы исследования, используемые в работе. Подробно описана технология получения слитка исследуемого литейного жаропрочного сплава ВКНА-1ВР и приведен его точный химический состав. Приведены микроструктуры и механические свойства исследуемых в работе сплавов ВКНА-1ВР и ВЖ175. При обсуждении методов исследований был проведен подробный сравнительный анализ регулирующих требований, предъявляемых к процедурам малоцикловых испытаний, в российском (ГОСТ 25.502-79) и зарубежных (ASTM E466 и ASTM E606) стандартах.

В третьей главе приведены результаты фрактографических исследований поверхности разрушения образцов из сплавов ВКНА-1ВР и ВЖ175, подвергнутых малоцикловым усталостным испытаниям при жестком и мягком цикле нагружения. Установлено влияние температуры испытаний и коэффициента асимметрии цикла на механизмы усталостного разрушения жаропрочных никелевых сплавов. Установлена высокая чувствительность механизмов разрушения в сплаве ВЖ175 к коэффициенту асимметрии мягкого цикла нагружения при высокотемпературных испытаниях.

Четвертая глава посвящена обсуждению результатов малоцикловых испытаний образцов из сплавов ВКНА-1ВР и ВЖ175 при жестком и мягком цикле нагружения с коэффициентами асимметрии (R), равном 0, 0.5, и -1. Литейный сплав ВКНА-1ВР был испытан при 20, 850 и 1050 °С, а деформируемый сплав ВЖ175 – при 20, 650 и 750 °С. Экспериментальные зависимости числа циклов до разрушения от заданной деформации или заданного напряжения были подвергнуты математической обработке с целью их аппроксимации и определения предела ограниченной выносливости на базе 10^4 циклов. Было установлено, что усталостные свойства сплава ВКНА-1ВР при жестком нагружении более чувствительны к изменению коэффициента асимметрии, чем у сплава ВЖ175. Проведено детальное исследование зависимости параметров петли упруго-пластического гистерезиса от количества циклов нагружения. Было показано, что при жестком цикле нагружения сплавы ВКНА-1ВР и ВЖ175 демонстрируют циклическую стабильность петли упруго-пластического гистерезиса во всем диапазоне исследуемых нагрузок, температур и асимметрий цикла. Установлено, что для сплавов ВКНА-1ВР и ВЖ175 при мягком асимметричном цикле нагружения при повышенной температуре наблюдается накопление односторонних деформаций циклической ползучести. При других режимах испытаний по мягкой схеме (при симметричном цикле нагружения или при комнатной температуре) накопление односторонних деформаций незначительно, однако наблюдаются большие деформации на нулевом полцикле. В заключительной части главы на примере сплава ВКНА-1ВР были построены обобщающие кривые усталости для симметричных циклов нагружения в координатах «амплитуда деформации – долговечность» и «амплитуда напряжения – долговечность». По ним можно судить о высоком совпадении усталостных свойств при мягком и жестком циклах нагружения. Это позволяет в дальнейшем прогнозировать с высокой вероятностью результаты таких испытаний.

В пятой главе предпринята попытка разработки алгоритмов расчета долговечности жаропрочных никелевых сплавов при произвольной асимметрии цикла. С этой целью было проанализировано семь математических моделей, использующие силовой, деформационный или энергетический подходы. Из них в качестве основных рабочих были выбраны четыре модели: 1) Смитта-Уотсона-Топпера, 2) Гудмана, 3) Гербера и 4) Марин. При обработке экспериментальных результатов было получено, что модель Смитта-Уотсона-Топпера лучше всего подходит для обобщения результатов испытаний при жестком цикле нагружения. Однако для испытаний при мягком цикле нагружения ни одна из четырех моделей не дала удовлетворительных результатов. Привлечение других математических моделей показало, что удовлетворительные результаты математического прогнозирования свойств при мягком нагружении позволяют получить модели Уокера и Гудмана-Гербера.

Научная новизна работы

Научная новизна диссертационной работы Ходинева Ивана Александровича не вызывает сомнений и заключается в том, что автор на основе полученных им экспериментальных результатов описал закономерности влияния условий проведения малоцикловых испытаний (коэффициента асимметрии цикла, температуры испытаний, деформационно-силовых условий нагружения) на характеристики усталостного поведения жаропрочных никелевых сплавов. Это позволило автору обосновать возможность прогнозирования механизмов разрушения и циклической долговечности исследуемых сплавов при различных способах нагружения.

В частности, новизна полученных результатов состоит в том, что в работе:

- по результатам фрактографического анализа образцов из сплавов ВКНА-1ВР и ВЖ175, испытанных при комнатной и повышенных температурах, была установлена связь между условиями испытаний на малоцикловую усталость и механизмом разрушения;

- установлены закономерности влияния температуры испытаний и коэффициента асимметрии цикла на сопротивление малоциклового усталости литейного сплава ВКНА-1ВР и деформируемого сплава ВЖ175;

- показано, что при симметричном цикле испытаний мягкий и жесткий методы нагружения образцов обоих исследуемых сплавов эквиваленты друг другу, что обусловлено циклической стабильностью петли упруго-пластического гистерезиса.

Практическая значимость работы

Практическая значимость диссертационной работы Ходинева Ивана Александровича, основана на том, что автор по результатам проведенных исследований показал возможность и разработал конкретные алгоритмы математического прогнозирования сопротивления усталостному разрушению жаропрочных никелевых сплавов ВКНА-1ВР и ВЖ175 в широком диапазоне температур и при произвольном выборе коэффициента асимметрии цикла. Полученные автором экспериментальные зависимости и результаты математического моделирования могут быть использованы при расчетах ресурса высоконагруженных деталей газотурбинных двигателей. Немаловажным является то, что на основе проведенных исследований автор доказал возможность сокращения объемов проведения усталостных испытаний за счет выявленной им эквивалентности результатов испытаний при «мягком» и «жестком» циклах нагружения при коэффициенте асимметрии, равном -1.

Достоверность

Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе Ходинева Ивана Александровича, подтверждается комплексным подходом при планировании и проведении исследований и большим объемом экспериментальных данных. Для обоснования методики проведения и выбора режимов малоцикловых усталостных испытаний были использованы современные отечественные и зарубежные нормативные документы, регламентирующие подобные исследования. Результаты испытаний были получены с использованием современного оборудования и подвергнуты всесторонней статистической обработке. Кроме того, полученные в работе экспериментальные результаты были грамотно проанализированы, сравнены с аналогичными результатами, опубликованными в отечественной и зарубежной научной литературе, а затем непротиворечиво объяснены с позиций современного материаловедения.

Соответствие работы критериям, предъявляемым к диссертациям

Диссертационная работа Ходинева Ивана Александровича является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важной материаловедческой проблемы установления взаимосвязи между характеристиками малоциклового усталости жаропрочных никелевых сплавов ВЖ175 и ВКНА-1ВР, с одной стороны, и параметров нагружения в условиях контролируемых деформации или напряжения, с другой стороны.

К достоинствам диссертационной работы можно отнести следующее:

- Большой объем экспериментальных исследований и математической обработки полученных результатов.

- Рассмотрены два жаропрочных сплава (один – литейный, другой – деформируемый), которые существенно отличаются по своей структуре и свойствам, что дает потенциальную возможность распространить обнаруженные закономерности и на другие никелевые сплавы.

- В диссертационной работе проведен подробный анализ существующих методик проведения испытаний, требований к образцам и сделан обоснованный выбор метода проведения испытаний.

- Показано влияние коэффициента асимметрии цикла на механизмы усталостного разрушения и циклическую долговечность исследуемых сплавов в условиях высокотемпературного нагружения.

В целом работа обладает необходимым внутренним единством, а представленные в ней научные результаты, позволяют их квалифицировать как новые, что свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку о металлах и сплавах. Выводы по работе, включающие рекомендации по методу оценки долговечности деталей из сплавов ВКНА-1ВР и ВЖ175 при произвольном коэффициенте асимметрии цикла при «жестком» и «мягком» нагружении, являются аргументированными и могут быть использованы при разработке новых газотурбинных двигателей для авиации. Таким образом, диссертационная работа Ходинева Ивана Александровича соответствует критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Замечания по работе:

1. Во второй главе диссертации подробно описана технология получения слитка исследуемого литейного сплава ВКНА-1ВР. Однако метод получения и технология обработки полуфабрикатов из второго исследуемого сплава ВЖ175, а именно штамповок диаметром 600 мм, в работе не указаны.

2. Образцы для малоциклового усталости из сплава ВЖ175 были вырезаны из штамповок диска газотурбинного двигателя. При этом, как утверждает автор, образцы, вырезанные из ступицы диска, были использованы преимущественно при низких температурах, а образцы, вырезанные из полотна и обода, – при высоких и близких к максимальным рабочим температурам. Однако автор в своей работе не приводит

результатов анализа возможности различий микроструктуры, формирующихся в различных областях сложной по геометрии штамповки, а также анализа возможности влияния этих различий на результаты усталостных испытаний.

3. В главе 3 приведены результаты фактографических исследований поверхности образцов, разрушенных в результате малоцикловых усталостных испытаний при различных циклах нагружения. Однако в подрисуночных надписях к рисункам 3.1 – 3.5 и в тексте, относящемся к соответствующим иллюстрациям, не указан коэффициент асимметрии цикла, применяемый в данном конкретном случае.

4. На стр. 44 автор пишет, что при анализе поверхности излома образца из сплава ВЖ175 в очаге зарождения трещины обнаружены зерна аномально большого размера (более 100 мкм), тогда как на рис. 2.2 показано, что средний размер зерен в этом сплаве равен 25-30 мкм. При этом причина формирования в структуре сплава таких крупных зерен и их влияние на свойства не обсуждены.

5. При описании характера разрушения исследуемых образцов сплава ВЖ175 автор многократно обращает внимание на наличие фасеток скола в очаге зарождения трещин, однако при этом не конкретизирует их связи со структурными составляющими исследуемого сплава.

6. Несмотря на то, что работа содержит большой объем экспериментальных данных, сам текст диссертации очень лаконичный, оставляющий желание более подробного обсуждения результатов и/или их теоретического анализа. При этом в тексте на соседних страницах иногда встречаются повторы в виде фрагментов с одинаковым смысловым содержанием.

7. Текст содержит опечатки, касающиеся как орфографии, так и математических символов, численных значений обсуждаемых характеристик, нумерации таблиц. В разных главах диссертации при описании одних и тех же характеристик усталостного поведения сплавов автор применяет обозначения с использованием то латинских, то русских букв. Например, число циклов нагружения, при котором происходит разрушение, он обозначает то N_f , то N_p .

Сделанные замечания не влияют на основные результаты работы и не снижают ее общую высокую оценку, научную новизну и практическую значимость.

Заключение

Полученные в диссертационной работе Ходинева Ивана Александровича научные результаты достоверны, изложены грамотно и логично, а выводы по работе обоснованы.

Автореферат диссертации содержит все необходимые квалификационные разделы и полностью отражает содержание диссертационной работы. Перечень выступлений на научных конференциях и публикаций автора по теме диссертационной работы свидетельствует о высоком личном вкладе автора в научное исследование. Опубликованные научные статьи отражают результаты работы на должном уровне.

Считаю, что диссертационная работа «Закономерности изменения характеристик малоцикловой усталости жаропрочных никелевых сплавов ВЖ175 и ВКНА-1ВР», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, соответствует пунктам 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842. По актуальности, научной новизне, практической значимости и достоверности сформулированных выводов диссертация соответствует научной специальности 2.6.17. Материаловедение, а ее автор Ходинев Иван Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент:

Гусев Дмитрий Евгеньевич



доктор технических наук 05.16.01

доцент, профессор Образовательного центра Института №11, СНС лаборатории «Материаловедение».

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Адрес: 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

Телефон: +7 916-581-87-88

Адрес электронной почты: gusev-home@mail.ru

31.10.2025

Подпись Гусева Дмитрия Евгеньевича удостоверяю

Директор

дирекции института №11



Беспалов Александр Владимирович

(М.П.)