

На правах рукописи



КИРЮШИНА Валентина Владимировна

**ИССЛЕДОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА ПРИ
РАЗРАБОТКЕ И ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ**

Специальность 05.17.11 – Технология силикатных и тугоплавких
неметаллических материалов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Обнинск – 2014

Работа выполнена в ГНЦ РФ ОАО «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология», ФГБУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Русин Михаил Юрьевич,
директор НПК – главный конструктор
ГНЦ РФ ОАО «ОНПП «Технология»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Лукин Евгений Степанович,
профессор кафедры химической технологии
керамики и огнеупоров
РХТУ им. Д. И. Менделеева
кандидат технических наук
Тарасовский Вадим Павлович,
заместитель генерального директора по науке
ЗАО «НТЦ Бакор»

Ведущая организация: ОАО «Научно-исследовательский институт
технического стекла»

Защита состоится "18" декабря 2014 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д.002.060.04 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова Российской академии наук по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института (ИМЕТ РАН) и на сайте ИМЕТ РАН www.imet.ac.ru/. Автореферат диссертации размещен на сайте ИМЕТ РАН www.imet.ac.ru/ и на сайте ВАК <http://vak.ed.gov.ru/>.

Автореферат диссертации разослан "___" _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.002.060.04,
кандидат геолого-минералогических наук



С. Н. Ивичева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В последние годы керамические материалы находят все более широкое применение в авиационно-космической технике и производстве элементов летательных аппаратов (ЛА). Специфические условия эксплуатации данных материалов в конструкциях, а именно воздействие агрессивных сред, высоких температур, давлений и др. вызывают необходимость в более детальном изучении их возможностей, определении взаимосвязей свойств с технологическими параметрами при получении материалов и изделий, установлении влияния на характеристики материалов различных эксплуатационных факторов.

Ввиду усложнения и усовершенствования ЛА, возрастания скоростей полета и экстремальных нагрузок, требования к безопасности элементов ЛА и надежности конструкционных материалов постоянно возрастают. Традиционно инженерные методы оценки надежности сводятся к сопоставлению внешних нагрузок и несущей способности. Используемые в детерминированном подходе максимальные расчетные нагрузки и нижний предел несущей способности имеют вполне определенные значения по сравнению с реальными величинами, обладающими случайным характером: нагрузка – вследствие случайного изменения параметров окружающей среды, скорости полета, инерционных сил, температуры и т.д.; несущая способность – из-за случайного разброса свойств материалов, возможной дефектности структуры, отклонений геометрических параметров в пределах установленных допусков и т.д.

Особенно актуально исследование стохастической природы несущей способности керамических изделий ввиду таких особенностей керамики как хрупкость, низкая трещиностойкость, распределение дефектов различных типов, размеров и местоположений в структуре материала, что является неотъемлемой чертой керамической технологии. В результате этого механические свойства керамики оказываются более чувствительными к дефектам микроструктуры, чем свойства конструкционных сталей и сплавов, и, соответственно, показатели этих свойств имеют более существенный статистический разброс. Кроме этого керамике присуще проявление масштабного фактора прочности и замедленное разрушение при уровне напряжений ниже предела прочности материала вследствие докритического подрастания трещин из существующих в материале дефектов микроструктуры.

Целью диссертационной работы является применение и усовершенствование при разработке и производстве элементов ЛА из керамических материалов физико-статистических моделей, учитывающих особенности хрупкого разрушения керамики наряду со стохастической природой эксплуатационных нагрузок.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие задачи:

1. Исследование показателей кратковременной прочности и прогнозирование долговременной работоспособности конструкционных керамических материалов и изделий ЛА на основе моделей хрупкого разрушения.

2. Исследование взаимосвязи распределения дефектов микроструктуры керамических материалов, прочностных показателей и требуемого уровня надежности изделий.

3. Разработка системы оценки качества, в том числе стабильности, технологических процессов производства изделий ЛА из конструкционной керамики на основе статистических методов.

4. Разработка физико-статистической модели оценки прочностной надежности элементов ЛА из керамических материалов с учетом изменчивости свойств конструкционных материалов и условий нагружения.

Методы исследования

В рамках настоящей диссертационной работы применялись следующие методы: метод статистических испытаний, статистические методы обработки данных, в том числе с использованием программы STATISTICA v.10, методы численного интегрирования и дифференцирования, классические методы строительной механики и теории упругости, метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе ANSYS.

Предмет исследования

Прочность материалов кварцевой керамики НИАСИТ и стеклокерамики ОТМ-357 и прочностная надежность (вероятность неразрушения) элементов ЛА, изготавливаемых из данных материалов.

Достоверность

Достоверность полученных результатов определяется корректным использованием методов теории прочности и надежности, вероятностно-статистического аппарата, применением апробированных аналитических и численных методов анализа и расчета, а также проведением испытаний образцов исследуемых керамических материалов по методикам, разработанным на основе действующих ГОСТ.

Значения коэффициентов запаса прочности и повышенная надежность изделий ЛА, разрабатываемых в ОАО «ОНПП «Технология», оценки которых получены в ходе выполнения данной диссертационной работы, подтверждены при испытаниях изделий на теплопрочностном стенде, а также телеметрией (отсутствием случаев разрушения) при испытаниях ЛА.

Научная новизна

1. На основе моделей хрупкого разрушения керамических материалов впервые установлены взаимосвязи допустимого предела прочности, напряженного объема, прочностной надежности и распределения размеров дефектов микроструктуры кварцевой керамики НИАСИТ и стеклокерамики ОТМ-357.

2. Впервые в оценке надежности элементов ЛА, изготавливаемых из кварцевой и стеклокерамики, исследованы и учтены статистические аспекты свойств материалов и эксплуатационных нагрузок, что является сутью предложенного вероятностного подхода к разработке элементов ЛА повышенной надежности.

Практическая значимость

1. Разработаны и внедрены методики оценки прочностных характеристик кварцевой керамики и стеклокерамики с позиции моделей хрупкого разрушения. Методики позволяют оценить:

- средний предел прочности при растяжении образцов материала;
- средний предел прочности при растяжении материала в изделии;
- минимальный предел прочности, ниже которого средний предел прочности при испытаниях на изгиб образцов материала, аттестуемых изделие, не допустим;
- минимально допустимое напряжение в изделии, обеспечивающее его несущую способность при заданных уровнях нагружения и надежности;
- долговременную работоспособность исследуемых материалов.

2. Выбраны и теоретически обоснованы значения критического уровня нагружения при контрольных испытаниях, проводимых с целью контроля качества керамического материала в изделии.

3. Определены функции плотности распределения размеров дефектов микроструктуры материалов НИАСИТ и ОТМ-357, и на их основе разработана методика оценки максимально допустимых размеров дефектов в изделии с учетом требуемой надежности.

4. Разработана система оценки качества технологических процессов производства изделий из кварцевой и стеклокерамики на основе статистических методов.

5. Проведен анализ чувствительности оценок прочностной надежности к неопределенностям физико-механических, теплофизических свойств материалов и эксплуатационного нагружения, позволивший выявить параметры, значения и разброс которых оказывают наибольшее влияние на надежность изделия.

Положения, выносимые на защиту

1. Теоретические и экспериментальные исследования показателей кратковременной прочности и долговременной работоспособности кварцевой керамики НИАСИТ и стеклокерамики ОТМ-357 и изделий из них.

2. Методики оценки минимально допустимых напряжений исследуемых керамических материалов в изделиях, максимально допустимых размеров дефектов микроструктуры материалов, критического уровня нагружения при контрольных испытаниях в зависимости от напряженного объема, эксплуатационных нагрузок и требуемой надежности изделий.

3. Физико-статистическая модель оценки прочностной надежности элементов ЛА, разработанная с учетом изменчивости свойств конструкционных материалов и условий нагружения.

4. Основные этапы вероятностного подхода к оценке свойств и надежности кварцевой керамики НИАСИТ и стеклокерамики ОТМ-357 и разработке из них элементов ЛА.

Реализация работы

Исследованные в диссертации статистические аспекты прочности, система контроля качества технологического процесса производства, методы оценки

надежности и разработанные на их основе методики внедрены и используются в прогнозировании прочности и прочностной надежности разрабатываемых в ОАО «ОНПП «Технология» изделий ЛА.

Результаты, полученные в работе на основе моделей хрупкого разрушения (выбор метода оценки параметров распределения предела прочности, установление необходимого объема выборки для получения достоверных оценок, масштабная зависимость прочности и т.д.) для кварцевой керамики НИАСИТ и стеклокерамики ОТМ-357, могут быть распространены на другой спектр хрупких керамических материалов и изделий из них.

Полученные результаты рекомендуется использовать на предприятиях авиационно-космической отрасли и в высших учебных заведениях в таких дисциплинах как «Материаловедение», «Основы надежности ЛА», «Проектирование конструкций ЛА».

Личный вклад автора в настоящую работу состоит в проведении теоретических исследований моделей хрупкого разрушения, статистической обработке экспериментальных данных, в выполнении компьютерного моделирования и расчетов прочностной надежности, а также анализе и обобщении полученных результатов.

Публикации

По тематике диссертации опубликовано **11** статей, **7** из которых в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, **15** тезисов докладов и **1** патент РФ на изобретение.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях, семинарах: Международная научно-техническая конференция *Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов*, ФГУП «ОНПП «Технология», г. Обнинск (2004г., 2010г.); Международная конференция *Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов (ТПКММ)*, МГУ, г. Москва (2005г.); Международная научно-практическая конференция *Композиционные материалы в промышленности*, УИЦ «Наука. Техника. Технология», г. Ялта (2005г., 2012г.); Международная конференция *Авиация и космонавтика-2005*, МАИ, г. Москва (2005г.); *European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS)*, Moscow (2005), Belgium (2007); Международная конференция *Деформация и разрушение*, ИМЕТ им. А. А. Байкова РАН, г. Москва (2006г.); *Петербургские чтения по проблемам прочности*, СГУ ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург (2007г.); Международная конференция *Физика прочности и пластичности материалов*, СамГТУ, г. Самара (2009г.).

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Результаты исследований представлены на **227** страницах основного текста, включающего **105** иллюстраций, **41** таблицу, библиографию из **132** наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается краткая характеристика объекта исследования, обоснована актуальность выбранной темы, ее научная новизна и практическая значимость, сформулированы цель и задачи диссертации.

В первой главе приведены описания основных конструкционных керамических материалов и особенностей технологических процессов производства из них высоконагруженных элементов ЛА повышенной надежности; выполнен литературный обзор отечественных и зарубежных работ, посвященных методам оценки прочности и надежности сложных технических устройств, теоретическим и экспериментальным исследованиям хрупкого разрушения керамики.

Первые работы, посвященные критике классической концепции условия прочности и применению вероятностных методов при разработке сооружений, принадлежат М. Майеру и Н. Ф. Хоциалову. Дальнейшее развитие эти идеи получили в работах А. Р. Ржаницына, Н. С. Стрелецкого, Я. Б. Шора. Выдающуюся роль в развитии общей теории надежности, которая стала методологической основой разработки сложных технических систем машиностроения, ракетостроения, строительства сыграли такие видные ученые, как А. А. Бать, Р. Барлоу, А. И. Берг, Н. Г. Бруевич, Б. В. Гнеденко, В. П. Когаев, К. Капур, Л. Ламберсон В. И. Сифонов, Б. С. Сотсков, С. А. Тимашев, И. А. Ушаков и др.

Разработке и введению в практику проектирования конструкций методики предельных состояний способствовали труды В. А. Балдина, А. А. Гвоздева, И. И. Гольденблата, В. М. Келдыша, Н. С. Стрелецкого. Принципиальные положения подхода о сведении определения вероятности неразрушения изделия к вычислению индекса (характеристики) безопасности были разработаны А. Р. Ржаницыным. В дальнейшем исследованиями индекса безопасности и анализом его чувствительности к рассеянию определяющих параметров изделия занимались Б. И. Беляев, Б. И. Снарскис, В. Д. Райзер, У.-Т. Ву (У.-Т. Wu), А. Джонсон (А. Johnson), О. Дитлевсен (О. Ditlevsen), С. Корнелл (С. А. Cornell), Н. Линд (N. C. Lind), Х. Мэдсен (H. O. Madsen), А. Хасофер (А. M. Hasofer) и др.

Применению вероятностных подходов к оценке надежности элементов ЛА посвящены работы Е. Б. Волкова, Л. И. Волкова, А. А. Золотова, В. А. Комягина, А. А. Кузнецова, А. Ф. Селихова, Р. С. Судакова, Т. А. Сырицына, М. И. Титова, А. М. Шишкевича, В. М. Чижова и др. За рубежом большое внимание развитию и применению вероятностной методологии проектирования уделяют такие организации, как Air Force, NASA Lewis, Northrop Grumman, Southwest Research Institute, Jet Propulsion Laboratory, NYMA.

Исследованиями конструкционных керамических материалов занимались А. Г. Эванс, Т. Г. Лэнгдон Ю. Л., Красулин, Ю. Е. Пивинский, А. Г. Ромашин, Е. И. Суздальцев, Ф. Я. Бородай, М. Ю. Русин и др. В разработку статистических моделей хрупкого разрушения основной вклад снесли В. Вейбулл, Т. А. Конторова, Я. И. Френкель, А. Фрейденталь. Впоследствии развитие и практическое применение эти модели получили в работах С. М. Баринава,

В. В. Болотина, В. Ву (W. Wu), Дж. Квинна (G. Quinn), А. Джаятилака (A. Jajatilaka), К. Труструма (K. Trustrum), Дж. Трантина (G. Trantina), Х. деЛоренци (H. deLorenzi), А. Палужный (A. Paluszny), В. Я. Шевченко, В. С. Левшанова. Исследованиями в системе «предел прочности – микроструктура – надежность» керамических материалов занимались С. Батдорф (S. B. Batdorf), А. А. Гриффитс, С. Джонсон (S. Johnson), Дж. Кроуз (J. G. Crose), Ф. Мак-Клинтон (F. A. McClintock), Х. Петерлик (H. Peterlik), Д. Шетти (D. K. Shetty) и др.

Анализ публикаций показал, что исследование свойств хрупких конструкционных материалов применительно к разработке и производству изделий авиационно-космической техники и проблема оценки их надежности в настоящее время является весьма актуальной и требует комплексного подхода с учетом физических и статистических аспектов хрупкого разрушения.

Во второй главе исследованы стохастическая природа кратковременной прочности и долговременной работоспособности кварцевой керамики НИАСИТ и стеклокерамики ОТМ-357; найдены функции распределения размеров дефектов микроструктуры исследуемых керамик и разработаны методики оценки максимально допустимых размеров дефектов, минимально допустимого напряжения и критического уровня нагружения в контрольных испытаниях в зависимости от напряженного объема и требуемой надежности изделий; для конкретных типов изделий приведены соответствующие расчеты.

Согласно модели наислабейшего звена, хрупкое разрушение керамики зависит от местного напряжения в точке, где встречается наиболее опасный дефект структуры, т.е. напряжение разрушения тела в целом определяется местным, а не средним напряжением. Прогнозирование прочностных показателей изделия по результатам испытаний образцов материала требует использования функции распределения предела прочности, устанавливающей взаимосвязь между вероятностью разрушения, напряжением и нагруженным максимальными напряжениями объемом. Для этой цели в статистической теории хрупкого разрушения применяется двухпараметрическое распределение Вейбулла, в обобщенном В. В. Болотиным виде записываемое как

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left[-\frac{1}{V_0} \int_V \left(\frac{\sigma}{\sigma_c} \right)^m dV \right] = 1 - \exp \left[-k \frac{V}{V_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_c} \right)^m \right], \quad (1)$$

где V_0 – объем стандартного образца; V – объем рассматриваемого изделия; σ – равномерно распределенные в объеме V максимальные растягивающие напряжения; m и σ_c – параметры распределения: m – модуль Вейбулла, характеризующий неоднородность структуры материала; σ_c – параметр масштаба (напряжение, вероятность разрушения при котором равна 63,2%); k – коэффициент, характеризующий вид нагружения. Произведение коэффициента нагрузки на полный объем изделия есть его напряженный (эффективный) объем V_{ef} .

Установлено, что распределение (1) хорошо согласуется по критерию согласия Манна с экспериментальными значениями предела прочности исследуемых керамик НИАСИТ и ОТМ-357, получаемыми при испытаниях образцов

материалов на трехточечный изгиб. В качестве примера на рис. 1 приведено типичное описание результатов эксперимента функцией (1) с параметрами $m = 9,1$ и $\sigma_c = 85$ МПа для материала НИАСИТ и $m = 9,5$ и $\sigma_c = 140$ МПа для ОТМ-357.

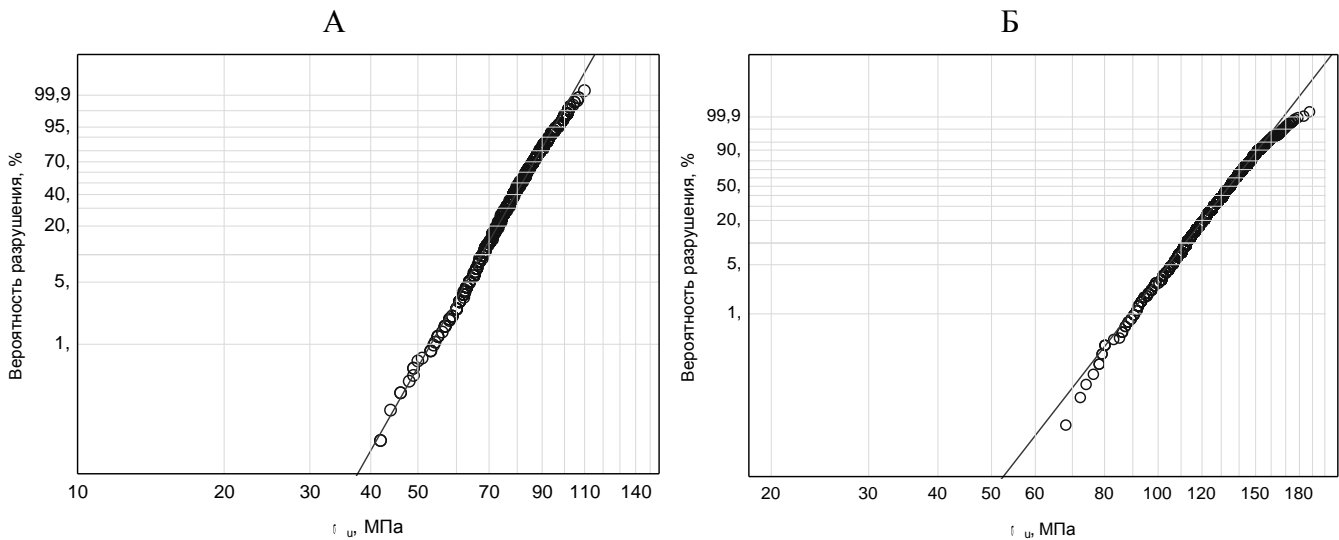


Рис. 1. Предел прочности при трехточечном изгибе образцов материалов НИАСИТ (А) и ОТМ-357 (Б) в координатной сетке Вейбулла

Оценки среднего значения и стандартного отклонения предела прочности изделия по модели Вейбулла (1) имеют следующий вид

$$\bar{\sigma} = \sigma_c \left(\frac{V_0}{V} \right)^{1/m} \Gamma(1 + 1/m), \quad (2a)$$

$$S_{\sigma} = \sigma_c \left(\frac{V_0}{V} \right)^{1/m} \sqrt{\Gamma(1 + 2/m) - \Gamma^2(1 + 1/m)}, \quad (2б)$$

где $\Gamma(\cdot)$ – гамма-функция. В случае оценки среднего значения и стандартного отклонения предела прочности образцов материала соотношение $V_0/V = 1$. Следует отметить, что описание предела прочности при изгибе распределением (1), в которое входит предел прочности при растяжении, возможно только при корректном пересчете коэффициента нагрузки, выступающего в качестве корректирующего множителя, связывающего пределы прочности при разных видах деформации.

Одной из основных проблем при использовании любой функции распределения является выбор надежного метода оценки ее параметров, полученных экспериментально на выборках ограниченного объема, а также нахождение минимально необходимого объема выборки, позволяющего получить оценки параметров с необходимой точностью. В работе на основе компьютерного моделирования и последующего сравнения оценок параметров Вейбулла, полученных различными методами, установлено, что графический метод совместно с использованием медианной порядковой статистики для построения эмпирического распределения и метода наименьших квадратов для построения теоретической функции распределения на вероятностной бумаге Вейбулла дает наименьшие ошибки оценок и наиболее прост в реализации. Для нахождения

доверительных границ оценок параметров рекомендовано использовать метод максимального правдоподобия. При оценке параметров по модельным выборкам различного объема установлено, что при размере выборок более 30 оценки модуля Вейбулла и параметра масштаба стремятся к истинным (модельным) значениям и уменьшается их разброс. При этом погрешности в оценках параметров довольно существенно сказываются на оценке прочностной надежности изделия и приводят к ее неправомерному завышению в небезопасную сторону.

Важным моментом использования модели наислабейшего звена в инженерных расчетах является учет масштабного фактора прочности. Из модели Вейбулла вытекает следующая формула для оценки масштабного фактора

$$\frac{\bar{\sigma}_0}{\bar{\sigma}} = \left(\frac{V_{ef}}{V_{ef0}} \right)^{1/m}, \quad (3)$$

где $\bar{\sigma}_0$, $\bar{\sigma}$ и V_{ef0} , V_{ef} – средние значения предела прочности при растяжении и эффективные объемы соответственно образца и изделия.

Данное соотношение можно использовать для оценки пределов прочности при различных схемах испытаний, на образцах разных размеров, а также для прогнозирования среднего предела прочности изделия по разрушающему напряжению испытанных образцов.

Кроме этого выражение (1) позволяет установить взаимосвязь между вероятностями разрушения образца P_0 и изделия P , имеющими различные эффективные объемы

$$P = 1 - (1 - P_0)^{V_{ef}/V_{ef0}}. \quad (4)$$

Задаваясь вероятностью разрушения образца и соотношением эффективных размеров, по уравнению (4) можно оценить вероятность разрушения изделия и по уравнению Вейбулла (1) соответствующее этой вероятности напряжение.

В масштабных зависимостях (3)-(4) вместо эффективных объемов V_{ef} могут быть использованы эффективные площади поверхностей S_{ef} .

Для исследуемых керамических материалов масштабный фактор прочности был подтвержден экспериментально, путем проведения испытаний на трехточечный изгиб репрезентативных выборок образцов материалов трех различных типоразмеров. Заготовки для образцов формовали из одного шликера и обжигали в соответствии с технологическими процессами производства изделий из материалов НИАСИТ и ОТМ-357, сохранив тем самым подобие в статистическом смысле образцов и изделий.

На рис. 2 приведены экспериментальные значения напряжения разрушения совместно с построенными по ним масштабными зависимостями (пунктирные линии) и масштабные зависимости по уравнению (3) с оцененными по экспериментальным данным параметрами распределения Вейбулла (сплошные линии). Различия в оценках разрушающих напряжений по уравнению (3) и полученных экспериментально составили не более 10%.

Несущая способность изделий из хрупких материалов в основном определяется уровнем появляющихся в них при эксплуатации растягивающих напряжений, к которым хрупкие материалы наиболее чувствительны. Поэтому при

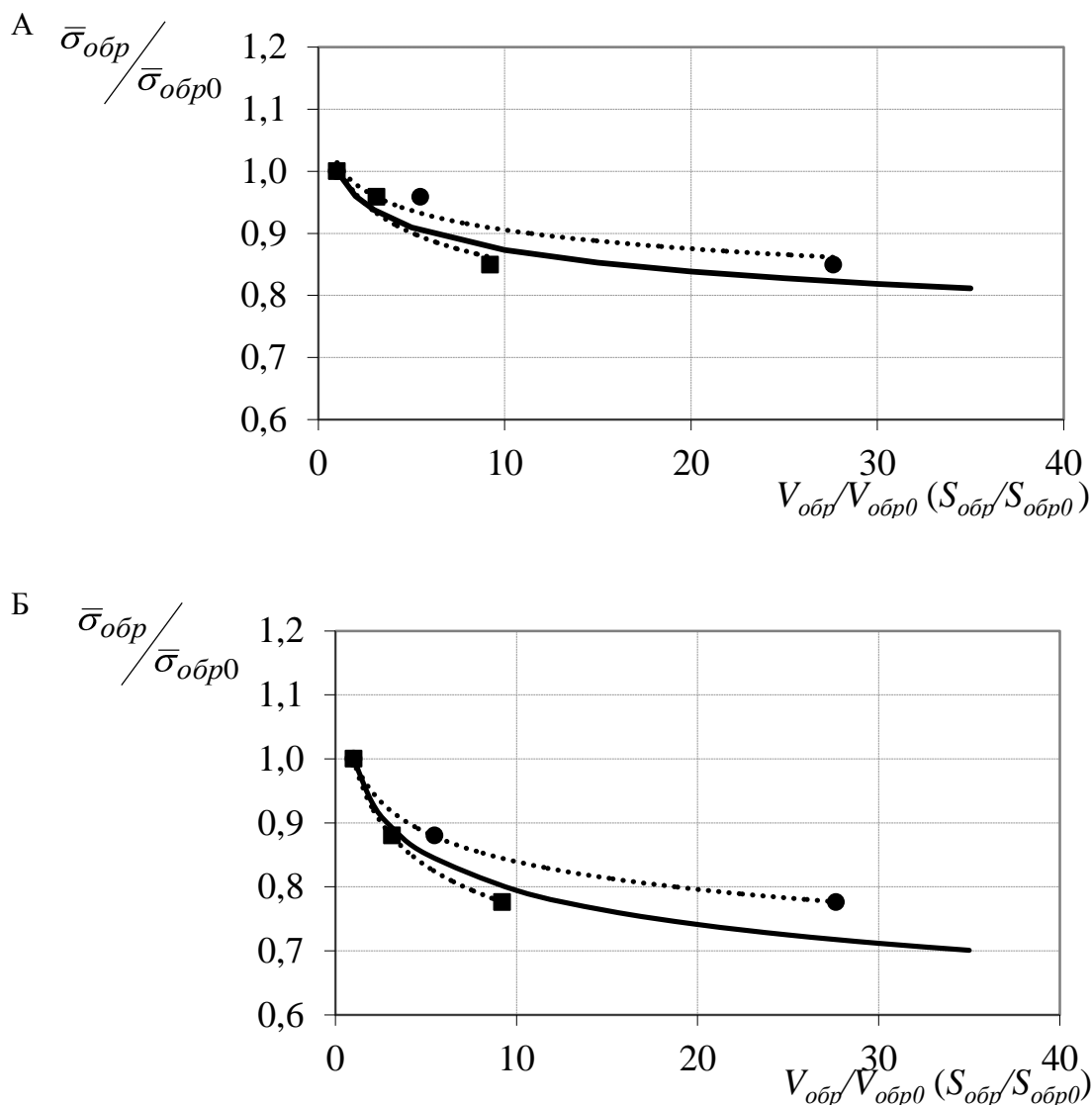


Рис. 2. Относительное снижение среднего напряжения разрушения $\bar{\sigma}_{обр} / \bar{\sigma}_{обр0}$ материалов НИАСИТ (А) и ОТМ-357 (Б) в зависимости от относительного увеличения объема образца $V_{обр} / V_{обр0}$ (●) и площади поверхности $S_{обр} / S_{обр0}$ (■)

оценке прочностной надежности разрабатываемых изделий необходимо знать предел прочности при растяжении используемых материалов. Однако испытания хрупких материалов на одноосное растяжение трудно реализуются экспериментально и имеют значительный разброс результатов. В связи с этим испытания на прямое одноосное растяжение редко используются для аттестации конструкционной керамики и, как правило, применяются косвенные методы.

Модель Вейбулла (1) и вытекающая из нее масштабная зависимость (3) позволили установить взаимосвязь между средним пределом прочности при растяжении и трехточечном изгибе, которая имеет вид

$$\bar{\sigma}_p = \bar{\sigma}_u \left[\frac{1}{2(m+1)^2} \frac{V_u}{V_p} \right]^{\frac{1}{m}}, \quad (5)$$

где $\bar{\sigma}_u$ и $\bar{\sigma}_p$, V_u и V_p – средние значения пределов прочности и объемы образцов при испытаниях на изгиб и растяжение. Экспериментально подтвержденная в работе зависимость (5) для обоих исследуемых материалов дает хорошую сходимость прогнозируемого значения предела прочности с пределом прочности, полученным на образцах при стандартных испытаниях (ошибка не более 1%).

Соотношение (5) позволяет при подстановке в него напряженного объема изделия оценить средний предел прочности при растяжении материала в изделии, а также при совместном рассмотрении (1), (2а) и (5) получить выражение

$$\sigma_{\theta} = \frac{\bar{\sigma}_u}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)} \left[\frac{V_u}{V_{ef}} \times \frac{\ln \frac{1}{R_a}}{2(m+1)^2} \right]^{1/m}, \quad (6)$$

характеризующее минимально допустимое растягивающее напряжение натурального изделия σ_{θ} с учетом требуемой надежности R_a . Именно значение (6), а не средний предел прочности, полученный на образцах материала, необходимо сравнивать с расчетными напряжениями для оценки коэффициента запаса прочности при условии требуемой надежности при поверочных расчетах.

В главе 2 описана разработанная методика оценки минимального предела прочности $[\sigma]$, ниже которого среднее напряжение разрушения при испытаниях на изгиб образцов, аттестующих изделие, недопустимо и соответствующее изделие должно быть забраковано. Использование данной методики при аттестации материала керамического изделия по прочности гарантирует обеспечение несущей способности с требуемой надежностью при воздействии на него заданного нагружения. Основная формула методики имеет вид

$$[\sigma] = \sigma_{\max} \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \left(\frac{V_u}{V_{ef}} \times \frac{\ln \frac{1}{R_a}}{2(m+1)^2} \right)^{-1/m}. \quad (7)$$

Данной методикой рекомендуется пользоваться на этапах разработки керамического изделия после проведения детерминированных расчетов его напряженно-деформированного состояния (НДС), позволяющих оценить возникающие в материале под воздействием приложенного нагружения максимальные расчетные напряжения и напряженный объем. При этом следует иметь в виду, что величина допустимого напряжения, являясь функцией напряженного объема изделия при заданном нагружении, может быть различной для изделий, изготовленных из одного и того же материала, но имеющих различный уровень нагрузки. Данное замечание в работе подтверждено расчетами уровней $[\sigma]$ конкретных изделий, разрабатываемых в ОАО «ОНПП «Технология». Кроме этого расчеты показали, что без потери надежности, можно снизить используемый в настоящее время необоснованно завышенный уровень минимально

допустимых напряжений при испытаниях на изгиб образцов материалов, тем самым снизив процент брака по прочности.

Для получения экспресс-оценки величины $[\sigma]$ можно воспользоваться приведенными на рис. 3 и 4 графиками зависимости допустимых напряжений при изгибе от максимальных растягивающих напряжений σ_{\max} для трех уровней надежности при соотношении объемов образца и изделия $V_0/V_{ef} = 10^{-2}$ (рис. 3) и влияния отношения V_0/V_{ef} на зависимость $[\sigma]$ от σ_{\max} при заданном уровне надежности $R_a = 0,99$ (рис. 4).

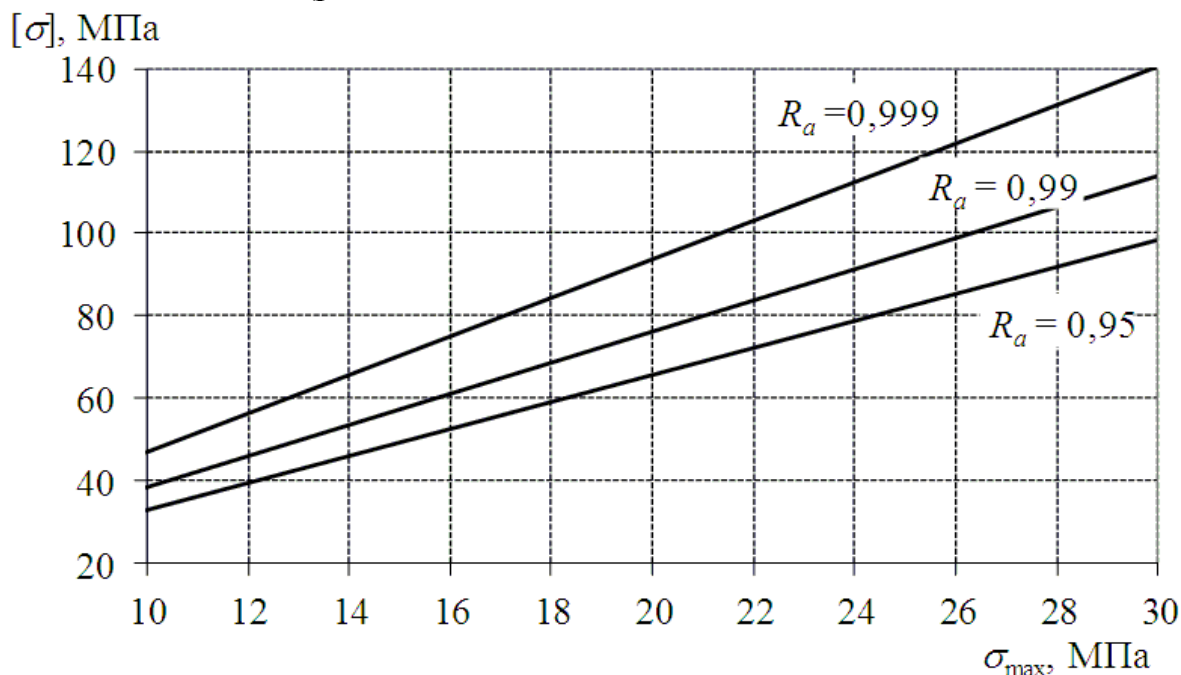


Рис. 3. Зависимость допустимых напряжений при изгибе $[\sigma]$ от максимальных расчетных напряжений в изделии σ_{\max} для различных уровней надежности при соотношении $V_0/V_{ef} = 10^{-2}$

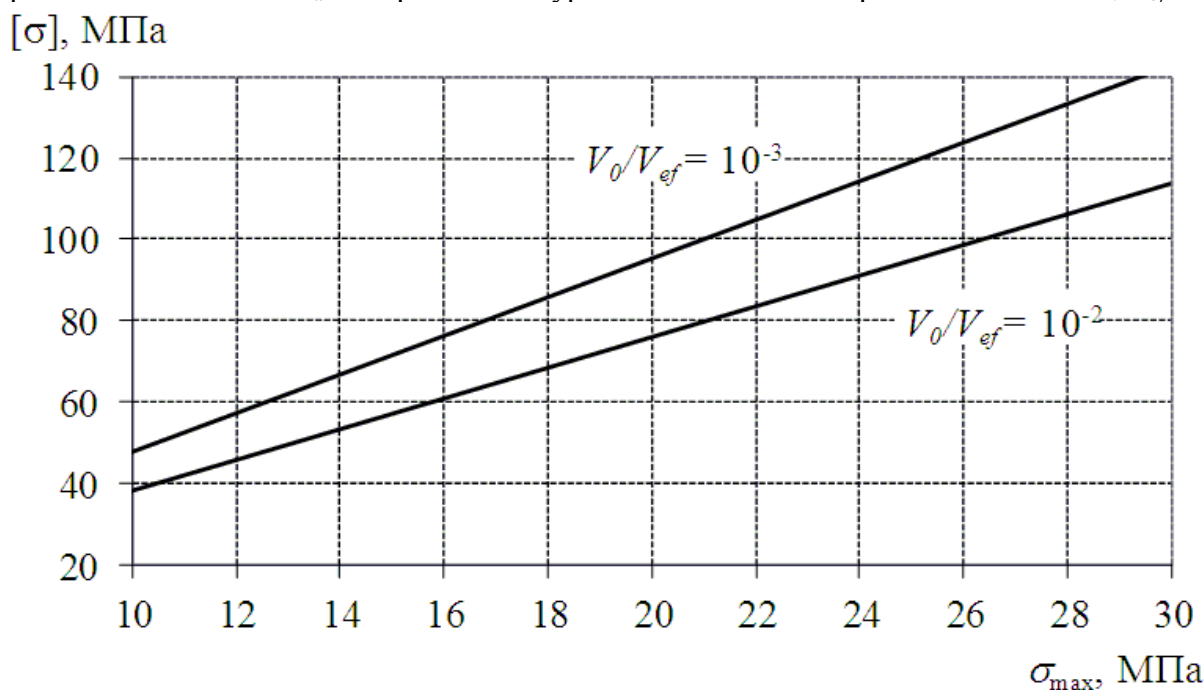


Рис. 4. Зависимость допустимых напряжений при изгибе $[\sigma]$ от максимальных расчетных напряжений в изделии σ_{\max} при уровне надежности $R_a = 0,99$ и различных соотношениях V_0/V_{ef}

Для обеспечения достаточной эксплуатационной надежности изделий из конструкционной керамики проводят их проверочные (или отбраковочные) испытания. Оптимально выбранное значение критического уровня нагружения при контрольных испытаниях позволяет уменьшить рассеяние предела прочности материала, отбраковывая изделия с низкой прочностью, и в то же время не вызывая необратимых повреждений в материале, приводящих к снижению его предела прочности или к разрушению изделия.

Разработанная методика оценки уровня контрольного давления опрессовки, применяемой в технологическом процессе производства элементов ЛА оболочечного типа как контрольное испытание, основана на модели Вейбулла и известном соотношении, связывающем значение внутреннего давления p с напряжением разрушения в окружном направлении оболочки радиусом r и толщиной стенки h . Выражение для верхнего предела давления опрессовки p_{\max} , при котором будут отбракованы изделия с прочностью ниже минимально допустимой с учетом требуемой надежности изделия в эксплуатации, имеет вид

$$p_{\max} = \frac{\bar{\sigma}_u h}{r \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)} \left(\frac{V_u}{V_{ef}} \times \frac{\ln \frac{1}{R_a}}{2(m+1)^2} \right)^{1/m}. \quad (8)$$

Полученное значение внутреннего давления необходимо скорректировать путем умножения величины p_{\max} на коэффициент $k_p = 0,7$, учитывающий возможное снижение предела прочности керамики в процессе опрессовки вследствие докритического роста трещин и возможное несовпадение распределения напряжений в оболочке при опрессовке и эксплуатационном нагружении.

В главе 2 представлены также результаты исследования замедленного разрушения и прогнозирования долговременной работоспособности кварцевой керамики НИАСИТ и стеклокерамики ОТМ-357. Время до разрушения керамического материала определяется скоростью субкритического подрастания трещины из существующих структурных дефектов до критического размера. Величиной, характеризующей чувствительность материала к субкритическому подрастанию трещины длиной c , является показатель степени n в кинетическом уравнении трещиностойкости

$$\frac{dc}{dt} = AK_I^n, \quad (9)$$

где K_I – коэффициент интенсивности напряжений; A – постоянная, зависящая от свойств материала.

Значения n , полученные в результате испытаний образцов материалов на замедленное разрушение методом динамической усталости, показывают, что материал НИАСИТ более устойчив к замедленному разрушению, чем стеклокерамика ОТМ-357 – $n = 65,7$ и $28,6$ соответственно.

На основе кинетического уравнения (9), модели Вейбулла (1) и результатов проведенных экспериментов в работе впервые для материалов НИАСИТ и

ОТМ-357 построены SPT- и STP-диаграммы (рис. 5), связывающие величину напряжений σ_d , вероятность безотказной работы R_a и время до разрушения t_f .

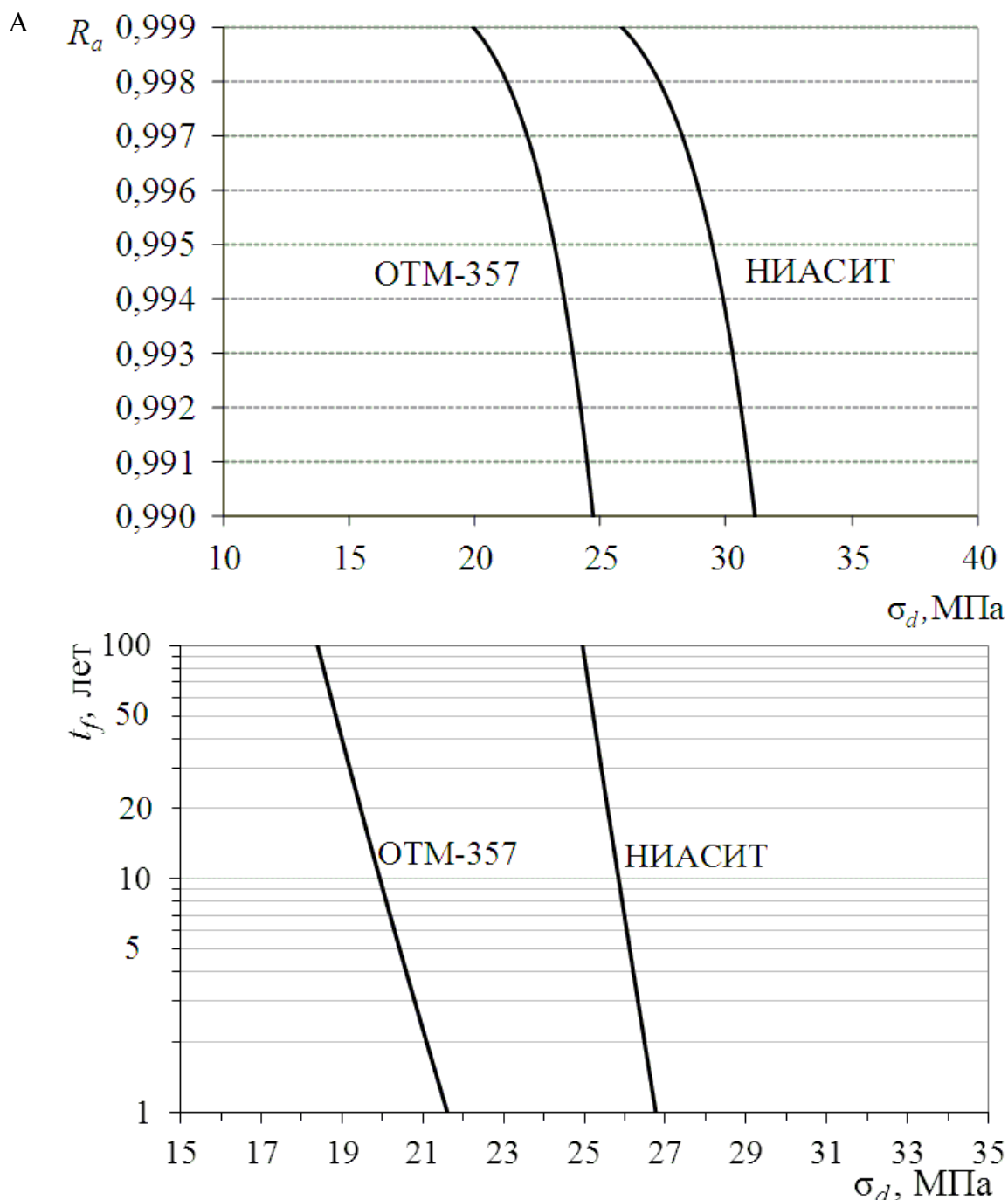


Рис. 5. Диаграммы долговременной работоспособности материалов НИАСИТ и ОТМ-357 (А – SPT-диаграммы для срока службы 10 лет; Б – STP-диаграммы при вероятности безотказной работы $R_a = 0,999$)

Анализ диаграмм показывает, что за срок службы не менее 10 лет максимально допустимые напряжения уменьшаются по отношению к исходному пределу прочности на 45,1 и 68,8% для материалов НИАСИТ и ОТМ-357 соответственно при установленной вероятности безотказной работы $R_a = 0,999$. Это также подтверждает вывод о том, что кварцевая керамика более устойчива к замедленному разрушению, чем стеклокерамика.

Статистические модели хрупкого разрушения строятся в предположении, что рассеяние значений напряжения разрушения материала является результатом как микро-, так и макроскопических случайных неоднородностей в материале, и таким образом, зависит от распределения размеров дефектов в его структуре.

В модели Вейбулла вводится гипотеза о распределении Коши (третьем асимптотическом распределении экстремальных значений) размеров дефектов вида

$$g(c) = g_0(c/c_0)^{-z}, \quad (10)$$

где c – длина трещиноподобного дефекта; g_0, c_0, z – параметры распределения. При этом распределение локальных напряжений по элементам объема материала связано с распределением по этим элементам наиболее опасных дефектов.

На основе экспериментальных значений пределов прочности были оценены параметры распределения (10) и получены функции плотности распределения размеров дефектов в структуре исследуемых материалов, представленные на рис. 6.

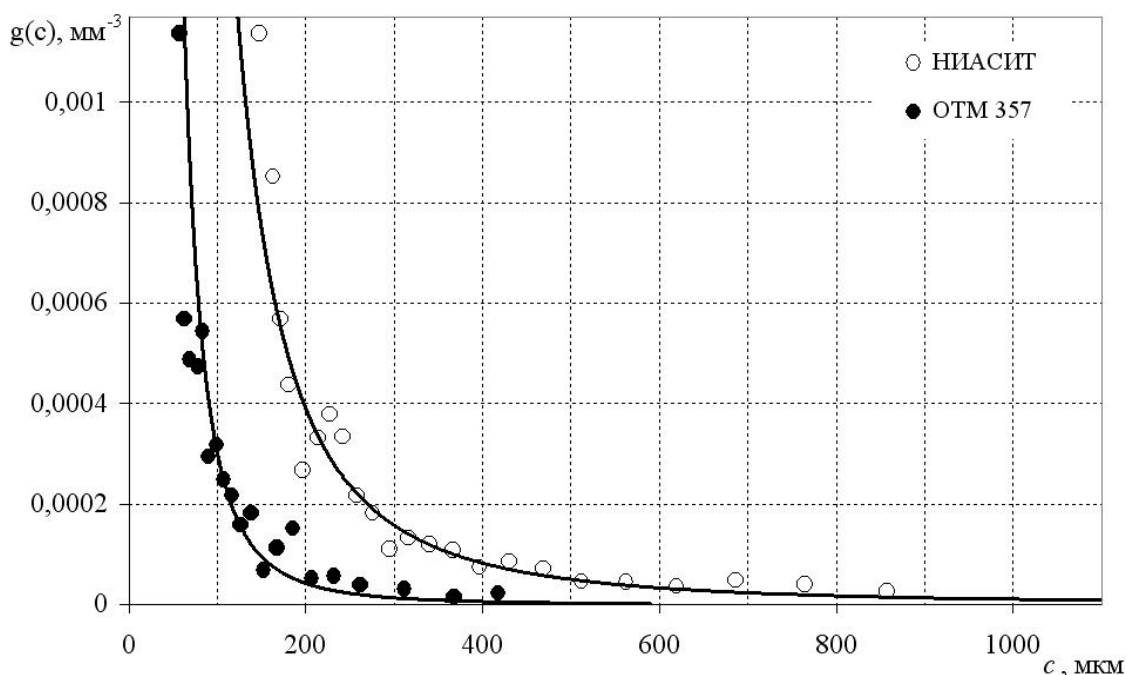


Рис. 6. Плотности распределения дефектов в материалах НИАСИТ и ОТМ-357

С учетом полученных функций распределения размеров дефектов рассчитаны вероятности существования дефектов выше определенного размера для стандартных образцов и изделий из кварцевой и стеклокерамики.

Зная величину вязкости разрушения K_{IC} , по теории Гриффитса можно оценить напряжения разрушения при растяжении материала с дефектами любых размеров, а также критический размер дефекта в материале, напряженном до заданного уровня.

Если известно минимально допустимое напряжение для керамической оболочки σ_θ , то максимально допустимый размер дефекта равен

$$c_g = \left(\frac{K_{IC}}{Y/Z\sigma_\theta} \right)^2, \quad (11)$$

где Y – параметр, зависящий от расположения дефекта ($Y \approx 1,99$ для поверхностных дефектов, $Y \approx \sqrt{\pi}$ – для объемных дефектов); Z – параметр, зависящий от формы дефекта (Z возрастает с увеличением отношения глубины к ширине трещины: $Z = 1$ для длинной неглубокой трещины, $Z = \pi/2$ для трещины с круглым профилем).

Вероятность разрушения при максимальном расчетном напряжении σ_{\max} изделия объемом V в зависимости от вязкости разрушения материала и параметров плотности распределения критических дефектов равна

$$P(\sigma_{\max}) = 1 - \exp \left\{ -V \frac{g_0 c_0}{z-1} \left(\frac{\sigma_{\max} \sqrt{\pi c_0}}{K_{IC}} \right)^{2(z-1)} \right\}. \quad (12)$$

Подход к оценкам критического размера дефекта и прочностной надежности на его основе используется в расчетной практике элементов ЛА, изготавливаемых в ОАО «ОНПП «Технология», в виде инженерной методики.

Другим подходом, увязывающим целостность материала в изделии с характерным размером элемента микроструктуры или дефекта в нем, является статистическая модель, разработанная Мак-Клинтоком и основанная на экспоненциальной функции распределения размеров критических дефектов

$$g(c) = a e^{-\alpha c}. \quad (13)$$

На основе модельных представлений о статистическом распределении зернограничных трещин вероятность разрушения при напряжении меньше или равном σ определяется как

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left\{ -\frac{Aa}{S} \exp \left(-\frac{b}{(\sigma/\sigma_0)^2} \right) \right\}, \quad (14)$$

где A – площадь поверхности изделия; S – площадь элемента структуры (поверхности зерна или дефекта в микроструктуре) материала; a и b – параметры распределения; $\sigma_0 = K_{IC} / (2\sqrt{c})$ – разрушающее напряжение материала, содержащего трещину длиной c . Для построения достоверных прогнозов по модели (14) рассматриваемая поверхность керамического изделия должна содержать порядка 10^3 элементов ее структуры.

С помощью статистической модели Мак-Клинтока найдена взаимосвязь коэффициента запаса прочности и прочностной надежности изделия с характерным размером элемента микроструктуры керамического материала. Предложенный подход позволяет оценить размер структурного элемента керамического материала и оптимизировать процесс разработки технологии получения новых керамических материалов с априори заданными прочностными свойствами.

В третьей главе проведен статистический анализ технологических процессов производства серийно выпускаемых в ОАО «ОНПП «Технология» изде-

лий из кварцевой керамики НИАСИТ и стеклокерамики ОТМ-357, оценены основные свойства материалов в изделиях, проанализированы индексы пригодности и воспроизводимости в динамике за последние 5 лет, выработана система оценки качества, в том числе стабильности, рассматриваемых технологических процессов на основе статистических методов.

В качестве анализируемых технологических параметров были исследованы состав исходного сырья, параметры шликера, условия формования и обжига заготовок. Важнейшими показателями, характеризующими материал и изделие, являлись линейные усадки по образующей и окружности, кажущаяся плотность, пористость (для материала НИАСИТ), предел прочности при изгибе, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь свойства, предел прочности при сдвиге.

Статистический анализ, выполненный в программе STATISTICA v.10, показал, что в большинстве случаев анализируемые технологические параметры, свойства материала и изделий за исследуемый период времени находятся в установленных технологической документацией допусках и имеют нормальные функции распределения, что является одной из характеристик стабильности рассматриваемых технологических процессов. Отдельно рассмотрены случаи выхода параметров за установленные допуски, причины отклонения от технологии, построены причинно-следственные диаграммы, диаграммы Парето и сформулированы рекомендации по увеличению количества годных изделий. Для контроля и своевременного реагирования на сдвиги в технологических процессах предложено использовать контрольные карты Шухарта.

С целью количественной оценки технологической надежности выполнен расчет показателей воспроизводимости рассматриваемых технологических процессов. Значения нижних индексов воспроизводимости C_{PL} для параметра предел прочности при изгибе σ_u за последние 5 лет, рассчитанные по методу $M_{1,3}$ ГОСТ Р ИСО 21747-2010, приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Значения нижних индексов воспроизводимости для параметра σ_u

Материал	Год				
	2010	2011	2012	2013	I полуг. 2014
НИАСИТ	2,422	2,288	2,714	2,517	2,828
ОТМ-357	1,450	1,321	1,327	1,483	1,341

Стабильность по разбросу данного параметра подтверждена по ГОСТ Р 50779.42-99. Как видно из таблицы, значения C_{PL} находятся на приемлемом уровне ($> 1,330$) и в настоящий момент достигают значений 2,828 и 1,341 соответственно для НИАСИТ и ОТМ-357. Оба процесса являются статистически управляемыми с небольшими колебаниями, существенно не отражающимися на качестве готовых изделий.

Разработанная в ходе диссертационного исследования система оценки качества технологических процессов производства элементов ЛА из НИАСИТ и

ОТМ-357 базируется на основных этапах статистической методики «шесть сигм» (DMAIC) и включает:

- сбор и накопление информации о технологических процессах в электронной базе данных;
- выявление основных причин проблем с качеством и их подтверждение;
- устранение проблем и совершенствование технологических процессов;
- вычисление показателей пригодности и воспроизводимости;
- оценка результатов и контроль над процессами с использованием контрольных карт.

В четвертой главе разработана физико-статистическая модель оценки прочностной надежности изделий ЛА с учетом статистических распределений физико-механических, теплофизических свойств материалов, тепловых и аэродинамических нагрузок, действующих на изделие в условиях эксплуатации; проанализировано влияние величины и рассеяния перечисленных параметров на оценку прочностной надежности стеклокерамического изделия посредством индекса безопасности.

При некоррелированности нагрузки и несущей способности и при известных законах их распределения вероятность выполнения физических критериев прочности в условиях эксплуатации, т.е. прочностная надежность изделия, определяется площадью пересечения кривых распределения, которая равна интегралу

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} f_F(F) \int_F^{\infty} f_L(L) dL dF = \int_{-\infty}^{\infty} f_L(L) \int_{-\infty}^L f_F(F) dF dL, \quad (15)$$

где F – расчетная нагрузка, действующая на изделие, усилие в элементе изделия или напряжение в нем; L – несущая способность, измеренная в тех же единицах, что и F ; $f_F(F)$ и $f_L(L)$ – плотности распределения нагрузки и несущей способности.

Случайный характер расчетной нагрузки характеризуется статистическим распределением максимальных расчетных напряжений в изделии, на которое влияет ряд определяющих параметров $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Вектор X состоит из параметров внешней среды (тепловых, аэродинамических, вибрационных, инерционных и др. нагрузок), точности механической обработки, особенности технологического процесса (изменчивости физико-механических и теплофизических свойств материалов). Определяющие параметры x_1, x_2, \dots, x_n имеют собственные законы распределения, установление которых и определение параметров распределений представляет значительные трудности.

Влияние статистических распределений определяющих параметров на возникающие в изделии максимальные расчетные напряжения учтено с помощью метода статистических испытаний (метод Монте-Карло) и проведения многократных расчетов НДС в программном комплексе ANSYS. Методом Монте-Карло моделировались для каждого расчета НДС реализации параметров x_1, x_2, \dots, x_n с законами распределения $F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)$ по следующей формуле

$$x_{ij} = F_i^{-1}(\xi_{ij}), \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, N}, \quad (16)$$

где ξ_{ij} – случайное число из отрезка $[0, 1]$, выдаваемое генератором случайных чисел; N – количество реализаций определяющих параметров, равное числу проведенных расчетов НДС.

Данный алгоритм был апробирован для оценки прочностной надежности изделия, состоящего из керамической оболочки (ОТМ-357), соединенной внахлестку через клеевой упругий слой (ВИКСИНТ У2-28НТ) с металлическим шпангоутом, представляющим собой две обечайки из инварового (32 НКМБЛ) и титанового сплавов (ВТ-20), соединенные телескопически и зафиксированные радиальными штифтами, установленными по скользящей посадке.

В качестве определяющих параметров были выбраны: силовая нагрузка и температура теплового потока по длине изделия; модули упругости, коэффициенты температурного линейного расширения (КТЛР), коэффициенты Пуассона, коэффициенты теплопроводности и удельной теплоемкости всех конструкционных материалов, степень черноты материалов оболочки и шпангоута. В качестве функций распределения определяющих параметров в работе на основе литературных данных был выбран нормальный закон распределения с математическим ожиданием, равным номинальному (или заданному) значению параметра, и коэффициентом вариации 10% от номинала. Вид кривой нагружения по длине изделия и вид температурных зависимостей свойств материалов полагались неизменными.

В результате проведения 1000 расчетов НДС рассматриваемой конструкции было получено распределение максимальных расчетных напряжений, представленное в виде плотности функции распределения на рис. 7.

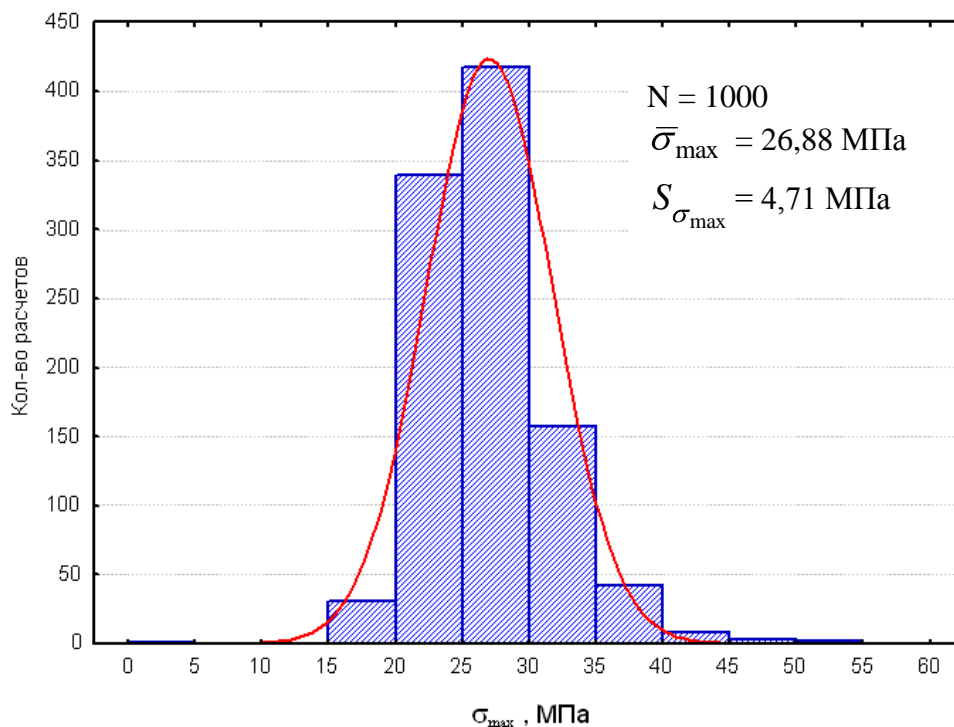


Рис. 7. Эмпирическая и теоретическая функции плотности распределения σ_{\max}

Полученное статистическое распределение σ_{\max} не противоречит нормальному закону распределения с математическим ожиданием 26,88 МПа и стандартным отклонением 4,71 МПа, уровень значимости по критерию согласия Колмогорова-Смирнова $p > 0,70$.

При подстановке в уравнение (15) функций нормального закона распределения максимальных расчетных напряжений и распределения Вейбулла допустимых напряжений оболочки изделия и численном взятии полученного интеграла

$$R = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S_{\sigma_{\max}}} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{(\sigma_{\max} - \bar{\sigma}_{\max})^2}{2S_{\sigma_{\max}}^2} - V_{ef}\left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_c}\right)^m\right) d\sigma_{\max} \quad (17)$$

оценена прочностная надежность изделия и ее доверительный интервал по уравнению

$$\Delta R = \Phi^{-1}\left(\frac{1+\alpha}{2}\right) \sqrt{\frac{\hat{R}}{N(1-\hat{R})}}, \quad (18)$$

где $\Phi^{-1}(\cdot)$ – квантиль функции Лапласа, α – доверительная вероятность. При $\alpha = 0,95$ оценка прочностной надежности и 95%-ный доверительный интервал оценки представлены в табл. 2.

Оценка прочностной надежности по уравнению (17) получена с учетом модели хрупкого разрушения и стохастической природы свойств конструкционных материалов и условий нагружения и является наиболее физической обоснованной.

Таблица 2 – Оценка и 95%-ный доверительный интервал оценки прочностной надежности

Метод оценки	R	ΔR
Norm + Weib (17)	0,995279	0,004269
Norm + Norm (19)	0,998776	0,002170
ММК (20)	0,994000	0,004782

Для сравнения в табл. 2 приведены также оценка и 95%-ный доверительный интервал оценки прочностной надежности изделия по классической формуле, основанной на использовании функции Лапласа и нормального закона распределения в качестве функции распределения допустимых напряжений материала керамической оболочки

$$R = \Phi\left(\frac{\bar{\sigma}_p - \bar{\sigma}_{\max}}{\sqrt{S_{\sigma_p}^2 + S_{\sigma_{\max}}^2}}\right), \quad (19)$$

где $\bar{\sigma}_p$ и $\bar{\sigma}_{\max}$, S_{σ_p} и $S_{\sigma_{\max}}$ – средние значения и стандартные отклонения соответственно допустимых и максимальных расчетных напряжений.

Кроме этого, была получена оценка прочностной надежности непосредственно с помощью метода Монте-Карло как

$$R = 1 - \frac{M}{N}, \quad (20)$$

где N – общее количество расчетов; M – количество расчетов, в которых σ_{\max} превышают уровень среднего предела прочности изделия.

Расчеты показали, что моделирование по методу Монте-Карло прогнозирует разрушение 6 изделий из 1000 и соответственно надежность равна 99,4%. Использование нормальных функций распределения и классической формулы теории надежности (19) завышает оценку надежности до уровня 99,8776%.

Другим методом, позволяющим не только учесть случайную природу определяющих параметров x_1, x_2, \dots, x_n в оценке прочностной надежности изделия, но и оценить влияние их величины и рассеяния, является метод оценки надежности первого порядка (FORM – First-Order Reliability Method), заключающийся в оценке надежности по формуле

$$R = 1 - \int_{g(\bar{X}) \leq 0} f_g(X) dX \approx \Phi(\beta), \quad (21)$$

где $g(X)$ – функция работоспособности (функция предельных состояний); β – индекс безопасности, равный, по определению, числу стандартных отклонений предельной функции, укладываемых в интервале от $g(X) = 0$ до среднего значения $g(X) = \bar{g}$, т.е.

$$\beta = \frac{\bar{g}}{S_g}. \quad (22)$$

Увеличение значения индекса безопасности приводит к возрастанию прочностной надежности изделия.

FORM применяется в случае линейности функции работоспособности и нормально распределенных переменных вектора X .

Линеаризация функции $g(X)$ выполнялась путем разложения в ряд Тейлора в окрестности математического ожидания

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) \cong g(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) + \sum_{i=1}^n \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{\bar{x}} \cdot (x_i - \bar{x}_i). \quad (23)$$

Тогда

$$\bar{g} \cong g(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n),$$

$$S_g = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{\bar{x}} \right)^2 \cdot S_{x_i}^2 + 2 \sum_{i < j} \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{\bar{x}} \left. \frac{\partial g}{\partial x_j} \right|_{\bar{x}} r_{ij} S_{x_i} S_{x_j}}, \quad (24)$$

где \bar{x}_i и S_{x_i} – среднее значение и стандартное отклонение переменной x_i ; r_{ij} – коэффициент корреляции x_i и x_j ; $i, j = \overline{1, n}$.

Для оценки индекса безопасности были приняты следующие допущения: отсутствие корреляции между определяющими параметрами и их попарное круговое рассеяние. Для преобразования исходных переменных модели

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ в стандартизированные нормированные (на стандартное отклонение) переменные $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ использовалась процедура

$$u_i = \Phi^{-1}[F(x_i)], \quad i = \overline{1, n}. \quad (25)$$

Оценка минимального уровня надежности R_{\min} , соответствующего установленным функциям работоспособности и распределения входных параметров модели, найдена путем решения задачи оптимизации, которая в факторном пространстве переменных U имеет вид

$$\begin{cases} \beta = \min_U \|U\| \\ g(U) = 0 \end{cases}. \quad (26)$$

Особая точка в факторном пространстве переменных U , в которой флуктуации переменных образуют комбинацию, приводящую к наихудшему значению выходной характеристики системы (экстремальные условия), есть наиболее вероятная точка (МРР – Most Probable Point). В МРР функция плотности совместного распределения переменных на поверхности предельного состояния имеет самое высокое значение и вносит наибольший вклад в отказ, т.е. это точка нахождения наихудшего варианта модели, соответствующего минимальному уровню прочностной надежности изделия.

В работе для решения задачи (26) использован метод, основанный на информации о производной функции работоспособности в направлении поиска и перемещении МРР от середины совместной плотности распределения к ее хвостам. Решение задачи оптимизации показало, что $\beta = 3,55$ и $R_{\min} = 0,999807$.

По результатам решения задачи оптимизации (26) выполнен анализ чувствительности надежности, заключающийся в нахождении влияния среднего значения и стандартного отклонения каждого x_i , $i = \overline{1, n}$ на индекс безопасности и, посредством этого, на прочностную надежность. Коэффициенты чувствительности $\varepsilon_{\bar{x}_i}$ и $\varepsilon_{S_{x_i}}$ представляют собой производные β по среднему значению \bar{x}_i и стандартному отклонению S_{x_i} определяющих параметров в найденной наиболее вероятной точке.

Графически значения коэффициентов чувствительности индекса безопасности для рассматриваемого расчетного случая представлены на рис. 8 в виде диаграммы, на которой отдельными прямоугольниками выделены определяющие параметры x_1, x_2, \dots, x_n в следующей последовательности:

- условия нагружения: температура теплового потока в трех сечениях по длине изделия, перерезывающая сила;
- основные свойства материалов оболочки и шпангоута – стеклокерамики ОТМ-357, инвара 32 НКМБЛ и титана ВТ-20: модуль упругости, КТЛР, коэффициент Пуассона, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, степень черноты;
- основные свойства герметика ВИКСИНТ У2-28НТ: модуль упругости, КТЛР, коэффициент Пуассона, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость.

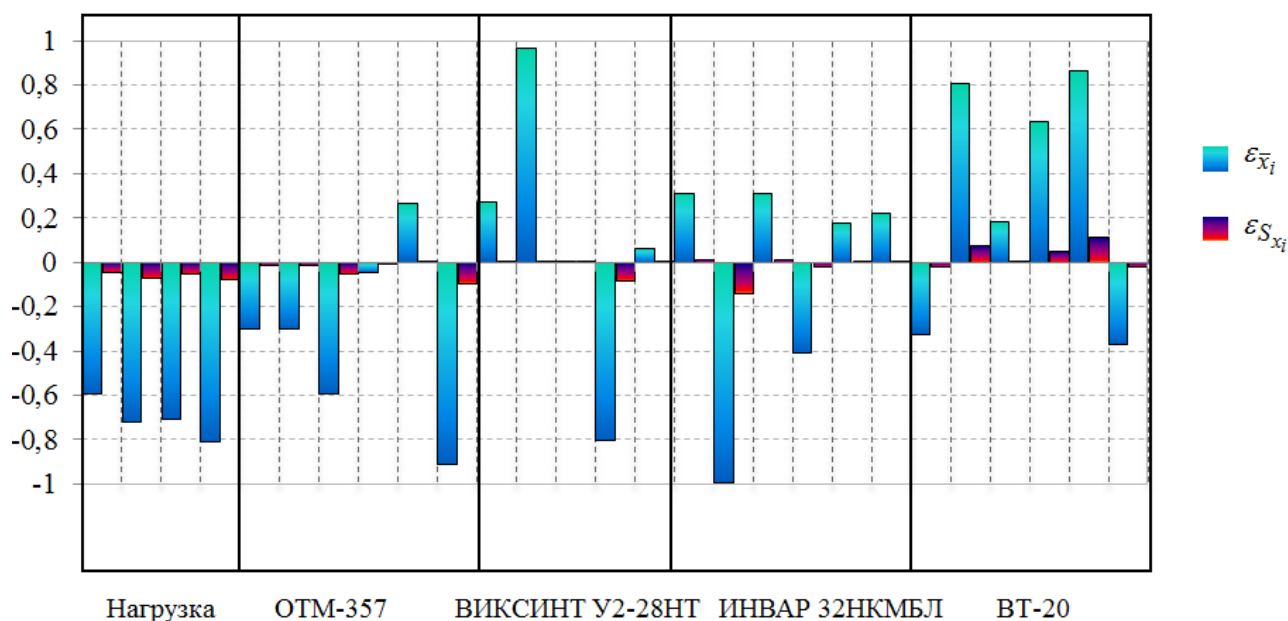


Рис. 8. Диаграмма чувствительности индекса безопасности к величине и рассеянию определяющих параметров модели

Таким образом, на основе обобщения проведенного в диссертационной работе исследования сформулированы *основные этапы вероятностного подхода* к оценке свойств керамических материалов и разработке элементов ЛА:

1. Установление возможных видов отказов изделий и функции работоспособности.

2. Исследование прочностных показателей керамического материала изделия с позиции моделей хрупкого разрушения.

3. Определение случайных параметров и их законов распределения, оказывающих влияние на НДС изделия, возникающее под воздействием приложенных нагрузок. Моделирование изменчивости параметров и проведение серии расчетов НДС.

4. Нахождение оценки, доверительного интервала и минимального уровня прочностной надежности изделия с учетом статистических распределений определяющих параметров изделия.

5. Анализ чувствительности оценок надежности к величине и рассеянию определяющих параметров изделия. При необходимости уменьшение рассеяния отдельных параметров.

6. Технологически и функционально правомерная оптимизация изделия на основе критерия прочностной надежности.

Структурная схема прогнозирования эксплуатационного поведения элементов ЛА из керамических материалов с использованием предложенного вероятностного подхода приведена на рис. 9.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Подтверждена правомерность использования модели хрупкого разрушения Вейбулла для исследования прочностных показателей двух керамических

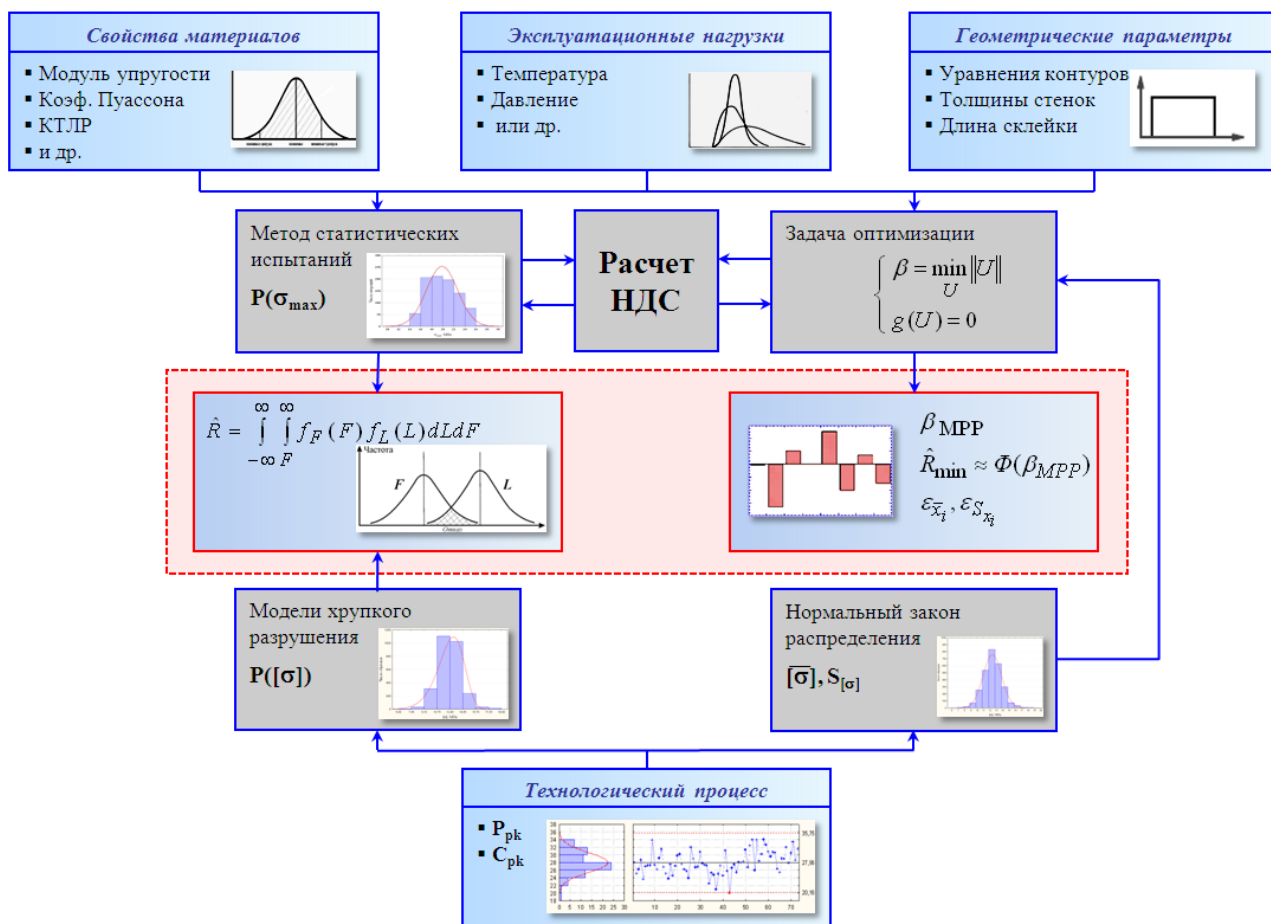


Рис. 9. Блок-схема прогнозирования эксплуатационного поведения элементов ЛА из керамических материалов с использованием предложенного вероятностного подхода

материалов – кварцевой керамики НИАСИТ и стеклокерамики ОТМ-357. В качестве метода оценки параметров распределения Вейбулла рекомендован графический метод, как наиболее простой и дающий наименьшие погрешности оценок. Объем репрезентативной выборки образцов для оценки среднего предела прочности и параметров его распределения, позволяющей проводить экстраполяцию в область экстремальных значений, составляет не менее 30 шт.

2. На основе экспериментальных данных и модели Вейбулла установлены масштабные зависимости прочности исследуемых керамических материалов. Данные зависимости позволяют прогнозировать допустимые напряжения натурального изделия по результатам испытаний образцов материалов, а также проводить взаимные оценки значений пределов прочности при разных схемах нагружения. Установлено, что для прогнозирования предела прочности при растяжении наиболее подходящей является модель Вейбулла с использованием результатов испытаний на трехточечной изгиб.

3. Разработана методика оценки минимального предела прочности, ниже которого среднее напряжение разрушения при испытаниях на изгиб образцов материалов НИАСИТ и ОТМ-357 недопустимо с точки зрения удовлетворения заданным требованиям к надежности. Методика также позволяет оценить минимально допустимое растягивающее напряжение в изделии, обеспечивающее его несущую способность при заданных уровнях нагружения и надежности. Все

оценки, полученные по данной методике, достаточно хорошо согласуются с результатами испытаний натуральных изделий на теплопрочностном стенде.

4. Выбраны и теоретически обоснованы значения критического уровня нагружения при контрольных испытаниях, проводимых с целью контроля качества керамического материала в изделии. Разработана соответствующая методика и проведены расчеты.

5. На основе статистических моделей Вейбулла, Мак-Клинтока, теории Гриффитса и полученных экспериментально значений вязкости разрушения определены функции плотности распределения размеров дефектов в материалах НИАСИТ и ОТМ-357, разработана методика оценки максимально допустимых размеров дефектов с учетом требуемой надежности и методика оценки прочностной надежности изделия с учетом распределения размеров дефектов в микроструктуре материала.

6. На основе теоретических исследований и экспериментальных данных построены STP- и SPT-диаграммы прогнозирования замедленного разрушения и долговременной работоспособности материалов НИАСИТ и ОТМ-357. Установлено, что кварцевая керамика НИАСИТ более устойчива к замедленному разрушению, чем стеклокерамика ОТМ-357, что объясняется ее структурой. Полученные результаты были использованы при разработке методики оценки назначенного ресурса и срока службы керамических материалов в изделиях ЛА, изготавливаемых в ОАО «ОНПП «Технология».

7. Проведен статистический анализ технологических процессов производства изделий из кварцевой керамики НИАСИТ и стеклокерамики ОТМ-357, исследованы взаимосвязи свойств с технологическими параметрами при получении материалов и изделий, проанализированы индексы воспроизводимости для параметра прочность при изгибе в динамике за последние 5 лет, разработана система оценки качества технологических процессов на основе статистических методов.

8. Исследованы изменчивости физико-механических, теплофизических свойств материалов и эксплуатационного нагружения изделия, и предложен алгоритм их моделирования на основе метода Монте-Карло, позволяющий путем проведения многократных расчетов НДС установить функцию распределения максимальных расчетных напряжений и оценить ее параметры. Получены оценки и 95%-ный доверительные интервалы прочностной надежности изделий ЛА различными методами. Оценено влияние величины и рассеяния каждого параметра на индекс безопасности.

9. На основе проведенного исследования сформулированы этапы вероятностного подхода к оценке свойств керамических материалов и разработке из них элементов ЛА. Предложенный вероятностный подход используется для подтверждения прочностной надежности и прогнозирования эксплуатационного поведения как серийно выпускаемых в ОАО «ОНПП «Технология» изделий авиационной техники, так и вновь разрабатываемых изделий. Кроме этого вероятностный подход является универсальным и может быть применен при проектировании других ответственных изделий из хрупких керамических материалов повышенной надежности.

**Список публикаций по теме диссертации (в изданиях,
рекомендованных ВАК РФ):**

1. Левшанов В. С., Русин М. Ю., Богацкий В. Г., Викулин В. В., Куракин В. И., **Кирюшина В. В.** Оценка надежности антенного обтекателя из стеклокерамики ракеты РВВ-АЕ в условиях серийного производства // *Авиационная промышленность*. – 2004. – № 3. – С. 46-49.
2. **Кирюшина В. В.**, Левшанов В. С., Фетисов В. С., Русин М. Ю. Оценка параметров распределения Вейбулла при анализе прочности керамических материалов для обтекателей // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – 2006. – Т. 12, № 1. – С. 76-82.
3. Левшанов В. С., Фетисов В. С., **Кирюшина В. В.**, Вережка В. Г., Русин М. Ю. Влияние масштабного фактора на прочность стеклокерамического антенного обтекателя // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – 2006. – Т. 12, № 3. – С. 312-316.
4. Левшанов В. С., **Кирюшина В. В.**, Фетисов В. С. Статистика прочности и дефекты структуры стеклокерамики // *Деформация и разрушение материалов*. – 2006. – № 11. – С. 40-45.
5. Баринов С. М., **Кирюшина В. В.**, Левшанов В. С., Фетисов В. С., Вережка В. Г. Исследование замедленного разрушения и прогнозирование долговечности керамики на основе диоксида кремния // *Деформация и разрушение материалов*. – 2010. – № 3. – С. 15-18.
6. **Кирюшина В. В.**, Левшанов В. С., Фетисов В. С., Русин М. Ю. Оценка качества керамического материала оболочки антенного обтекателя летательного аппарата методом опрессовки // *Огнеупоры и техническая керамика*. – 2011. – № 9. – С. 37-39.
7. **Кирюшина В. В.**, Левшанов В. С. Оценка надежности антенных обтекателей летательных аппаратов с учетом неопределенностей свойств материалов // *Огнеупоры и техническая керамика*. – 2012. – № 4-5. – С. 53-57.

