

Государственный научный центр РФ Открытое акционерное общество
"Обнинское научно-производственное предприятие "Технология"

На правах рукописи

КИРЮШИНА Валентина Владимировна

УДК 666.764.3: 629.7

**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"

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
д-р техн. наук, профессор
М. Ю. Русин

Обнинск – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЛА	
1.1. Основные керамические материалы и технологические процессы производства высоконагруженных элементов ЛА	15
1.2. Надежность и принципы оценки надежности невосстанавливаемых элементов ЛА	21
1.3. Особенности прогнозирования эксплуатационного поведения керамических материалов в элементах ЛА	27
1.4. Выводы и рекомендации.....	31
ГЛАВА 2. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИ- АЛОВ В ЭЛЕМЕНТАХ ЛА С ПОЗИЦИИ МОДЕЛЕЙ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ.....	
2.1. Модель наислабейшего звена Вейбулла	33
2.1.1. Методы оценки параметров модели	41
2.1.2. Объем выборки для оценки параметров модели	45
2.2. Исследование масштабного фактора прочности керамических материалов.....	52
2.3. Исследование взаимосвязи между пределами прочности керамиче- ских материалов при разных схемах испытаний	58
2.4. Разработка методики оценки допустимого предела прочности керамических материалов в изделиях с заданными уровнями нагружения и надежности	64
2.5. Исследования в системе «структура – предел прочности» керами-	

ческих материалов.....	69
2.5.1. Модель разрушения Вейбулла с распределением Коши наибольших критических дефектов.....	75
2.5.2. Модель разрушения Мак-Клинтока с экспоненциальным распределением наибольших критических дефектов.....	81
2.5.3. Модель Вейбулла с бимодальным распределением дефектов.....	87
2.6. Контрольные испытания керамических элементов ЛА оболочечно- го типа избыточным внутренним давлением.....	96
2.7. Надежность керамических материалов при замедленном разруше- нии. Оценка параметров кинетики роста трещин и прогнозирова- ние долговременной работоспособности материалов.....	100
2.8. Выводы и рекомендации.....	109

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕМЕНТОВ ЛА ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.....

3.1. Технологическая надежность элементов ЛА из керамических мате- риалов.....	112
3.1.1 Статистический анализ технологического процесса произ- водства изделий из кварцевой керамики.....	118
3.1.2 Статистический анализ технологического процесса произ- водства изделий из стеклокерамики.....	135
3.2. Оценка качества технологических процессов производства.....	144
3.3. Выводы и рекомендации.....	150

ГЛАВА 4. ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЛА ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.....

4.1. Анализ и моделирование неопределенностей при разработке элементов ЛА.....	152
4.2. Расчет напряженного-деформированного состояния составных	

оболочечных конструкций элементов ЛА.....	156
4.3. Оценка прочностной надежности элементов ЛА из керамических материалов с учетом изменчивости свойств конструкционных материалов и условий нагружения на основе метода Монте-Карло	173
4.4. Выбор оптимальных параметров элементов ЛА по критерию прочностной надежности	177
4.5. Анализ чувствительности индекса безопасности к изменчивости свойств конструкционных материалов и условий нагружения	183
4.6. Основные этапы вероятностного подхода к оценке свойств материалов и разработке элементов ЛА.....	186
4.7. Выводы и рекомендации	188
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	189
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	192
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	206

ВВЕДЕНИЕ

Объект исследования

Ввиду возрастания скоростей полета современных летательных аппаратов (ЛА), экстремальных нагрузок, усложнения и усовершенствования конструктивных схем и тактико-технических характеристик [1, 2], требования к безопасности ЛА в целом и его составным элементам в частности постоянно возрастают. Одной из актуальных проблем проектирования ЛА является обеспечение их надежности [3, 4]. Требуемая вероятность безотказной работы достигает в настоящее время уровня 99,9% и выше.

Комплекс всех, подчас противоречивых, требований, предъявляемых к элементам ЛА, определяется их назначением и условиями эксплуатации и формирует основные потребительские свойства конструкционных материалов, используемых для производства элементов ЛА.

Керамические материалы, ввиду их исключительных преимуществ перед металлическими материалами, находят все более широкое применение в авиационно-космической отрасли и ракетостроении (антенные обтекатели, линзы, иллюминаторы, теплозащитные элементы и пр.).

Объектом исследования в диссертационной работе являются конструкционные керамические материалы для элементов ЛА, в частности головных радиопрозрачных конструкций, представляющих собой соединенные внахлестку посредством адгезионного слоя и/или механических приспособлений (болтов, зажимов и т.п.) радиопрозрачную оболочку и металлический шпангоут [5].

Одной из ключевых проблем создания головных радиопрозрачных элементов ЛА является выбор материала радиопрозрачной части. В качестве конструкционных материалов применяются такие неметаллические материалы, как стеклопластики, ситаллы и различные керамические материалы, причем по мере увеличения скоростей полета ЛА и, соответственно, нагрузок на их головную часть, керамика, как материал с высокими механическими характеристиками, низкой теплопроводностью, высокой термостойкостью, высокой эрози-

онной устойчивостью и достаточной технологичностью становится все более предпочтительной [6-10]. При этом решающим фактором при выборе материала для разработки изделия является стабильность диэлектрической проницаемости и относительно невысокие значения тангенса угла диэлектрических потерь, свойственные керамическим материалам.

Актуальность работы

Выбор керамических материалов для изготовления элементов ЛА влечет за собой ряд трудностей. Кроме неоспоримых достоинств керамические материалы имеют следующие общие недостатки, сдерживающие их широкое применение в качестве конструкционных материалов.

Керамике присуща хрупкость и низкая трещиностойкость [11-13], что приводит к неожиданному разрушению ее даже при незначительных напряжениях. Керамика чувствительна к концентрации напряжений в таких местах как проточки, надрезы, острые кромки, резкие изменения толщины.

В структуре материала, несмотря на отработанность технологии и тщательную обработку изделия, присутствует случайное распределение дефектов (включений, пор, микротрещин и т.п.) различных типов, размеров и местоположений [14-19]. В результате механические свойства керамики зависят от дефектов микроструктуры в большей степени, чем свойства конструкционных сталей и сплавов, и, соответственно, показатели этих свойств имеют более существенный статистический разброс. Поэтому, например, значения среднего предела прочности, полученные при испытаниях образцов керамики, служат лишь показателями потенциальных характеристик данной партии образцов и условий производства, и их нельзя использовать в качестве истинных значений предельных напряжений, выдерживаемых изделием.

Так как в большем объеме материала можно встретить большее количество дефектов, разрушающие напряжения керамического изделия будет меньше предела прочности, полученного в результате испытания образцов. В этом проявляется так называемый масштабный фактор прочности [13, 16].

Зависимость разрушающего напряжения от времени, в течение которого материал находится под действием внешних нагрузок, обусловлена докритическим подрастанием трещин из существующих в материале дефектов микроструктуры. Поэтому для установления условий надежной эксплуатации изделий из конструкционной керамики необходимо исследование замедленного разрушения и прогнозирование долговечности.

Перечисленные особенности керамических материалов необходимо учитывать на всех этапах разработки и производства изделий, при прогнозировании эксплуатационного поведения изделий и количественной оценке их надежности, которая является одним из наиболее важных показателей качества как для изготовителя, так и для заказчика.

Традиционно инженерные методы оценки надежности материалов и изделий из них сводятся к сопоставлению внешних нагрузок и несущей способности. Используемые в детерминированном подходе максимальные расчетные значения нагрузок и нижний предел несущей способности являются вполне определенными величинами по сравнению с реальными величинами, имеющими случайный характер (рис. 1): нагрузка – вследствие случайного изменения параметров окружающей среды, скорости полета, давления, инерционных сил, температуры и т.д.; несущая способность – из-за случайного разброса свойств конструкционных материалов и погрешностей производства (возможной дефектности структуры материала, отклонений геометрических параметров в пределах установленных допусков и пр.).

Стохастическая природа эксплуатационных нагрузок и несущей способности в традиционном подходе учитывается в завуалированной форме с помощью коэффициента безопасности. Данный подход значительно упрощает решение многих проблем, возникающих при разработке сложных технических устройств. Однако ему присущ ряд недостатков. Во-первых, применение данного нормативного метода не позволяет оптимизировать параметры системы, в том числе свойства материалов по требуемой надежности. Во-вторых, метод не является системным. В нормативных документах и справочниках основных от-

раслей техники отсутствуют количественные взаимосвязи параметров нагружения и коэффициентов безопасности с требуемой надежностью изделия, которая оценивается лишь качественно. В-третьих, в детерминированном подходе нет возможности в полном объеме учесть условия эксплуатации, вариабельность параметров системы, физико-механических и теплофизических свойств материалов, дефектность их микроструктуры и сочетание данных факторов.

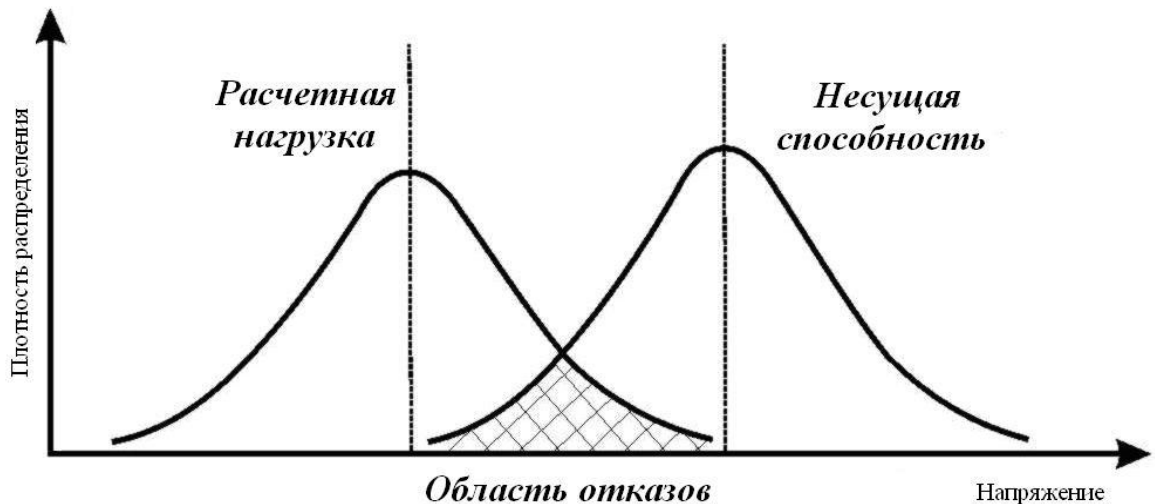


Рис. 1 Вероятностный подход в проектировании

Интерес к замене коэффициента безопасности появился со времени попыток вероятностной интерпретации разрушения различных технических сооружений механиками-строителями и датируется концом 20-х годов прошлого столетия. Однако первые работы по надежности изделий не получили достаточного признания из-за отсутствия систематизированного статистического материала. И только спустя десятилетия существенно увеличился объем и уровень исследовательских работ в этой области, в том числе применительно к авиационно-космической технике.

Использование вероятностных методов, статистических моделей, описывающих свойственное керамике хрупкое разрушение, и знаний механики разрушения в анализе керамических изделий и оценке надежности, дает возможность решить эти проблемы и приводит к новому *вероятностному подходу* в

исследовании свойств материалов и разработке конструкций, принципиально отличающемся от проектирования изделий из металлических материалов.

Цель

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.

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.

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.).

Благодарность

Автор выражает глубокую благодарность директору НПК «РПО» – главному конструктору ОАО «ОНПП «Технология», д.т.н., профессору М. Ю. Русину за помощь и руководство работой; начальнику лаборатории высокотермостойких неорганических радиопрозрачных материалов ОАО «ОНПП «Технология», д.т.н. Е. И. Суздальцеву за помощь в руководстве работой, оперативные консультации и ценные советы; бывшему сотруднику ОАО «ОНПП «Технология», к.т.н. В. С. Левшанову, оказавшему значительное влияние на

формирование концепции работы, за постоянное внимание, участие в обсуждении результатов исследований и поддержку, а также всему коллективу сектора анализа и расчета напряженно-деформированного состояния и надежности материалов и конструкций из керамики и стеклопластиков ОАО «ОНПП «Технология» за помощь в организации проведения экспериментов, выполнении расчетов напряженно-деформированного состояния элементов ЛА и общую поддержку в процессе написания работы.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЛА

1.1. Основные керамические материалы и технологические процессы производства высоконагруженных элементов ЛА

Работы по созданию керамических материалов для радиопрозрачных элементов высокоскоростных ЛА в США и СССР были начаты в 60-х годах прошлого столетия. Прорабатывался широкий ассортимент материалов: окисная керамика на основе оксидов алюминия, магния, бериллия и др., нитридная керамика, а также ситаллы – стеклокристаллические материалы на основе стекла [4, 6-10, 20-26]. К настоящему времени доведены до стадии широкого внедрения три вида высокотермостойких неорганических материалов: ситаллы, высокоглиноземистая и кварцевая керамика, сравнительная характеристика которых приведена в табл. 1.1.

Алюмооксидная (корундовая) керамика обладает наиболее высокой по сравнению с другими керамическими материалами механической прочностью, высокими деформационными свойствами и химической устойчивостью, малыми диэлектрическими потерями и нулевым влагопоглощением [6, 8, 20].

Однако из-за пониженной термостойкости и предела прочности при температурах выше 500-800°C этот материал не нашел широкого применения для изделий ЛА, работающих на скоростях более 4 М.

Другим недостатком алюмооксидной керамики является высокая температура обжига и возникновение существенных деформаций в процессе спекания, что ограничивает технологические возможности материала.

Изделия ЛА небольших размеров (длиной до 0,5 м) из алюмооксидной керамики изготавливают холодным шликерным литьем, горячим литьем термопластичных шликеров под давлением, горячим прессованием, изостатическим прессованием, электрофоретическим осаждением или газоплазменным напылением.

Таблица 1.1 – Сравнительные характеристики высокотермостойких неорганических материалов

Материал	Основные достоинства материалов и изделий ЛА	Недостатки
Кварцевая керамика	<p>Высокая термостойкость материала</p> <p>Стабильность диэлектрических характеристик в широком интервале температур и частот</p> <p>Хорошие термозащитные характеристики</p> <p>Технологичность производства изделий сложного профиля</p>	<p>Низкая механическая прочность</p> <p>Необходимость влагозащиты и герметизации</p> <p>Низкая устойчивость к пылевой и дождевой эрозии</p>
Стеклокристаллические материалы (ситаллы, Пирокерам)	<p>Отсутствие пористости</p> <p>Высокая стойкость к климатическим воздействиям и морской воде</p>	<p>Недостаточная термостойкость</p> <p>Недостаточная термостабильность</p> <p>Недостаточная стабильность тангенса угла диэлектрических потерь</p>
Высокоглиноземистая керамика	<p>Высокая прочность материала и оболочки</p> <p>Устойчивость к дождевой эрозии и воздействию агрессивных сред</p>	<p>Низкая устойчивость к термоудару</p> <p>Высокая температура спекания</p>

Алюмооксидная керамика используются для изготовления элементов ЛА, работающих на скоростях до 4-4,5 М. Особенно широко применяется этот материал в США для обтекателей ракет типа «Sparrow».

Кварцевая керамика обладает всем комплексом необходимых свойств, а именно высокой термостойкостью, достаточной прочностью, стабильными ди-

электрическими и хорошими теплозащитными свойствами [6-10, 21, 22]. Высокую термостойкость кварцевой керамики, в первую очередь, определяет низкий коэффициент температурного линейного расширения, значительно более низкий, чем у других керамических материалов.

Среди неорганических диэлектриков материалы на основе аморфного диоксида кремния (кварцевая керамика) имеют самую низкую теплопроводность. При нагреве и охлаждении кварцевая керамика не претерпевает фазовых превращений, сопровождающихся изменением объема, вплоть до температуры 1300°C, может эксплуатироваться до температуры плавления аморфного SiO₂, а кратковременно (до нескольких секунд) температура поверхности может достигать 2000°C. Ее теплопроводность определяется структурой, пористостью и наличием примесей.

Большое значение с точки зрения обеспечения радиотехнических характеристик имеет также абсолютная величина диэлектрической проницаемости. У кварцевой керамики она самая низкая и это не только снижает искажения диаграммы направленности антенны и СВЧ энергии на переотражение, но и упрощает технологический процесс мехобработки оболочек, так как требования на допуски по толщине стенки более низкие, чем для других материалов.

Основным недостатком кварцевой керамики является влагопоглощение, особенно при высокой пористости. Для обеспечения работоспособности элементов ЛА в различных климатических условиях применяются разнообразные технологические приемы. Так, внутреннюю поверхность изделия в целях защиты от конденсации влаги в порах пропитывают различными термостойкими полимерами (полиметилсилоксан, метилфенилспиросилоксан и др.), чем достигается еще один положительный эффект – существенно повышается предел прочности керамики SiO₂ на растяжение.

Большим преимуществом кварцевой керамики является её технологичность. Для организации производства изделий из неё не требуется дорогостоящее оборудование, а сырьём служат широко распространенные на земной поверхности кварцевые материалы – жильный кварц и кварцевые концентраты,

стекольные пески. Используются также различные отходы производства кварцевого стекла. Изделия из кварцевой керамики легко формуются методом водного шликерного литья в обычных гипсовых формах. Температура обжига изделий из кварцевой керамики составляет 1240-1270°C, для чего применяют удобные в эксплуатации электрические печи (вместо высокотемпературных газовых для обжига изделий из Al_2O_3 с температурой 1650°C).

В связи с небольшой твердостью, изделия из кварцевой керамики сравнительно просты в механической обработке. Благодаря небольшим усадкам при обжиге (до 1,5 % кварцевой керамики против 10 % для высокоглиноземистой керамики), а также удобству в формовке шликерным литьём, по сравнению с центробежным формованием ситалловых изделий, создаются условия для получения изделий из кварцевой керамики с малыми припусками на мехобработку. Это существенно упрощает технологию производства изделий, сокращает трудоёмкость, расход сырья и материалов.

Кварцевая керамика нашла широкое применение в изделиях для высокоскоростных ЛА различных классов, работающих на скоростях 5-10 М. Кварцевая керамика с пористостью 8-10% широко используется в производстве головных антенных элементов современных ЛА [1, 2], эксплуатация которых предусматривает использование защитных транспортно-пусковых контейнеров.

Ситаллы и стеклокерамика характеризуются отсутствием пористости и нулевым влагопоглощением, стабильностью механических и диэлектрических характеристик при длительном воздействии повышенной влажности, морской воды, ядерного излучения, высокой эрозионной устойчивостью к пылевому и дождевому воздействию, высокой термостойкостью [9, 23-25].

Основными недостатками ситаллов являются сравнительно низкие прочностные показатели и невысокая стойкость к термоудару, что вызывает необходимость химического (ионообменного) упрочнения изделия.

Изделия из ситаллов изготавливаются по традиционной стекольной технологии, включающей: подготовку шихты заданного химического состава; варку стекла; формование изделий из расплавленной стекломассы центробежным ли-

тъем, прессованием или прокаткой; отжиг изделий; кристаллизацию изделий и их механическую обработку. Кроме этого, в ОАО «ОНПП «Технология» был разработан стеклокерамический материал литийалюмосиликатного состава [25, 26], полученный по керамической технологии, которая позволила совместить процесс спекания материала и кристаллизацию стекла, использовать различные способы формования из дисперсных масс, включая и водное шликерное литье заготовок, дала возможность утилизировать технологические отходы и незаменима при небольших объемах производства, а также частой и оперативной смене ассортимента продукции. Керамическая технология способна существенно расширить химические и фазовые составы синтезируемых материалов, обеспечить получение более однородных структур, расширить диапазон свойств материалов и их уровень и др.

По уровню основных физико-технических свойств данный материал соответствует аналогичным зарубежным материалам, изготовленным по традиционной стекольной технологии, а по термостойкости, стабильности прочностных и диэлектрических свойств в диапазоне температур от 20 до 1175°C существенно их превосходит [26-29]. По термостойкости лишь незначительно уступает пористой кварцевой керамике. Наличие небольшого количества закрытых пор в комплексе с керамоподобной структурой является препятствием процессу распространению трещин.

Ситаллы используются как в США, так и в России для изготовления радиопрозрачных изделий ЛА, работающих на скоростях 4-7 М. Особенно широкое применение нашел этот материал для изделий морского и аэродромного базирования.

Диссертационная работа посвящена исследованию двух конструкционных керамических материалов на основе SiO_2 , используемых в ОАО «ОНПП «Технология» при производстве радиопрозрачных элементов ЛА: кварцевой керамики НИАСИТ [7, 21, 22] и литийалюмосиликатной стеклокерамики ОТМ-357 [25, 26]. Основные свойства данных материалов приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2 – Сравнительные свойства материалов НИАСИТ и ОТМ-357

Свойство	Кварцевая керамика НИАСИТ	Стеклокерамика ОТМ-357
Плотность кажущаяся, кг/м ³	1940-2050	2410-2550
Водопоглощение, %	4-6	0,01-0,1
Пористость открытая, %	7-12	≤ 0,1
Предел прочности при статическом изгибе при температуре 20°С, МПа	≥ 34	≥ 100±10
Предел прочности при осевом сжатии при температуре 20°С, МПа	≥ 98	270±90
Модуль упругости статический при температуре 20°С, МПа	≥ 2,6×10 ⁴	(5,4±0,2)×10 ⁴
Ударная вязкость, кДж/м ²	≥ 0,78	2,2±0,3
Микротвердость, МПа	5320	8000±300
Коэффициент Пуассона	0,25	0,29
Температурный коэффициент линейного расширения (средний) в интервале температур, α·10 ⁷ , К ⁻¹		
(20-200) °С	6±2	5±2
(20-300) °С	5±2	7±2
(20-900) °С	5±2	14±2
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К при температуре		
20°С	0,83±0,12	1,72±0,17
300°С	0,95±0,14	1,75±0,18
500°С	1,01±0,15	1,77±0,18
1000°С	1,20±0,18	1,83±0,20
Удельная теплоемкость, кДж/кг·К при температуре		
20°С	0,74±0,07	0,92±0,09
300°С	1,04±0,10	1,09±0,12
500°С	1,14±0,11	1,17±0,13
1000°С	1,27±0,13	1,12±0,16
Коэффициент температуропроводности, а·10 ⁶ , м ² /с при температуре		
20°С	0,57±0,08	0,73
300°С	0,47±0,07	0,67
500°С	0,45±0,07	0,64

Свойство	Кварцевая керамика НИАСИТ	Стеклокерамика ОТМ-357
Диэлектрическая проницаемость при частоте $f=10^{10}$ Гц и температуре 20°C	3,30-3,53	6,5-7,5
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте $f=10^{10}$ Гц в вакууме, $\text{tg}\delta \cdot 10^4$, не более		
20°C	≤ 40	130
700°C	–	580
1200°C	≤ 100	–
Спектральный полусферический коэффициент излучения (степень черноты) при $\lambda=0,65$ мкм, $d=5$ мм, % при температуре	13,0-15,0	20,5±1

1.2. Надежность и принципы оценки надежности невосстанавливаемых элементов ЛА

Эффективность любого сложного технического устройства определяется *надежностью*, которая по определению есть свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования [30]. Надежность изделия должна быть оценена уже на этапе проектирования, что позволит отказаться от конструктивных решений низкой надежности, тем самым, экономя временные, материальные и другие затраты изготовителя.

К количественным показателям надежности относятся: функциональные показатели – вероятность безотказной работы, плотность интенсивности отказов, числовые показатели – средняя наработка на отказ, назначенный ресурс, средний срок службы и т.д. [30-33]. Показатели надежности изделия рассчитываются, исходя из функциональных параметров изделия, которые определяются свойствами конструкционных материалов, и условий эксплуатации, и ввиду их случайности имеют вероятностный характер.

Основной функцией исследуемых радиотехнических элементов ЛА, определяемой их предназначением, является полная защита антенного блока ЛА от воздействия экстремальных условий окружающей среды и при этом минимизация вносимых искажений в излучаемое или принимаемое электромагнитное поле. Следовательно, предельными состояниями, приводящими к отказам изделий, в общем случае являются:

- нарушение целостности изделия: разрушение (потеря прочности), общая или местная потеря устойчивости, появление недопустимых деформаций, усталостное разрушение и т.п.;
- нарушение радиопрозрачности изделия: выход радиотехнических характеристик (РТХ) за установленные допуски.

Поскольку рассматриваемые изделия являются невозстанавливаемыми объектами однократного применения, основным и, пожалуй, самым важным показателем их надежности является вероятность безотказной работы [34].

Вероятность нахождения изделия в безотказном состоянии (вероятность ненаступления отказа) определяется совместным наступлением двух принятых взаимонезависимых событий и по теореме умножения вероятностей равна

$$R = R_M \times R_{\Pi}, \quad (1.1)$$

где R_M – вероятность ненарушения целостности (*механическая или прочностная надежность*); R_{Π} – вероятность ненарушения радиопрозрачности (*параметрическая надежность*).

Параметрическая составляющая надежности изделий на этапе проектирования оценивается по прогнозируемым по математическим моделям кривым РТХ, на этапах отработки опытных образцов – корректируется и подтверждается снятием замеров РТХ изделия на радиотехническом стенде. В качестве методов оценки параметрической надежности можно использовать методы, основанные на приближении Судакова [35, 36] или теории выбросов случайных процессов [37]. Данные методы в настоящее время автоматизированы, доведены до практического применения и активно используются в расчетах надежности всех типов элементов ЛА, выпускаемых ОАО «ОНПП «Технология».

Механическая составляющая надежности элементов ЛА из хрупких керамических материалов определяется вероятностью неразрушения, для оценки которой необходимо знать несущую способность изделия и действующие на него внешние нагрузки.

Условие недопустимости предельного состояния по прочности можно записать в виде композиции

$$\psi = L - F > 0, \quad (1.2)$$

в виде отношения (коэффициента запаса)

$$\eta = \frac{L}{F} > 1, \quad (1.3)$$

или в виде прямого сравнения

$$L > F, \quad (1.4)$$

где F и L – внешняя нагрузка и несущая способность в расчетном случае нагружения изделия.

Тогда вероятность наступления предельного состояния вычисляется как

$$P(\psi < 0) = \int_{-\infty}^0 f(\psi) d\psi, \quad (1.5)$$

или

$$P(\eta < 1) = \int_0^1 f(\eta) d\eta, \quad (1.6)$$

где $f(\psi)$ и $f(\eta)$ – функции плотности распределения соответствующих параметров состояния ψ и η .

В случае использования (1.4) прочностная надежность будет равна

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} f_F(F) \int_F^{\infty} f_L(L) dL dF = \int_{-\infty}^{\infty} f_L(L) \int_{-\infty}^L f_F(F) dF dL. \quad (1.7)$$

Как следует из вышесказанного, при исследовании и оценки надежности на всем этапе жизненного цикла изделия используются как индивидуальные функции распределения параметров конструкции, так и их совместное распределение. Так, например, если условие безотказности формулируется как превышение действующими напряжениями предела прочности материала, то,

отыскав распределения этих двух параметров, по уравнению (1.7) можно оценить надежность. С другой стороны, надежность можно оценить, найдя вероятность отказа по уравнениям (1.5) или (1.6), если известно распределение параметра состояния в виде (1.2) или (1.3), и вычтя ее из единицы. При этом параметры состояния представляют собой уже не разность (или отношение) детерминированных величин нагрузки и несущей способности, а имеют собственные функции распределения.

Распределение случайной величины ψ использовал впервые А. Р. Ржаницын, а распределение коэффициента η – Н. С. Стрелецкий, чьи работы явились продолжением разработки метода расчета надежности как вероятностной прочности, начатого в 1926–1929 гг. Н. Ф. Хоциаловым и М. Майером [38]. Разработке и введению в практику проектирования конструкций методики предельных состояний способствовали также труды В. А. Балдина, А. А. Гвоздева, В. М. Келдыша, И. И. Гольденבלата.

В общем случае в зависимости от условий безотказности в качестве величин F и L могут быть взяты следующие параметры конструкции:

- максимальное действующее напряжение и предел прочности;
- максимальная и допустимая деформации;
- вязкость разрушения и коэффициент интенсивности напряжений;
- максимальный и допустимый размер трещины;
- глубина коррозии и критическая толщина материала;
- рабочий и допустимый уровни помех и др.

В случае, если надежность рассматривается как временная характеристика, вероятность безотказной работы определяется как вероятность того, что за время функционирования системы T параметры состояния \vec{Z} в n -мерном пространстве состояний не выйдут за область допустимых состояний системы Ω или за допустимые пределы Z_{iH} (нижний), Z_{iB} (верхний), $i = \overline{1, n}$ [32]

$$R = P(\vec{Z} \in \Omega) = P(Z_{1H} < Z_1 < Z_{1B}; \dots; Z_{nH} < Z_n < Z_{nB} | t \leq T). \quad (1.8)$$

Если известна плотность распределения вектора \vec{Z} , т.е. плотность совместного распределения параметров состояния в любой момент времени t $f(z_1, z_2, \dots, z_n | t \leq T)$, то надежность

$$R = \int_{\Omega} f(z_1, z_2, \dots, z_n | t \leq T) dz_1 dz_2 \dots dz_n. \quad (1.9)$$

В общем случае Z_1, Z_2, \dots, Z_n являются коррелированными случайными функциями времени, в связи с чем вычисление интеграла в последнем выражении сопряжено с большими трудностями.

Чтобы учесть зависимости параметров состояния от времени в методиках расчета надежности, как правило, используют теорию выбросов случайных процессов [37]. Однако использование случайных процессов при расчете надежности вызывает непреодолимые математические трудности, так как процессы, как правило, нестационарные. Чтобы получить расчетные формулы в конечном виде, используют различные допущения:

1) нестационарный случайный процесс на всем отрезке времени заменяют на малых участках времени работы изделия отрезками стационарных процессов с параметрами, равными средним параметрам нестационарного процесса на рассматриваемом участке времени;

2) нестационарный случайный процесс заменяют многомерной случайной величиной, образованной из сечений процесса;

3) случайный процесс заменяют одномерной случайной величиной, образованной из сечения случайного процесса в расчетном случае нагружения.

При наличии одного параметра состояния, не зависящего от времени, надежность можно оценить по формуле

$$R = P(Z_H < Z < Z_B) = \int_{Z_H}^{Z_B} f(z) dz, \quad (1.10)$$

а при его нормальном законе распределения вероятностей –

$$R = \Phi\left[\frac{Z_B - m_Z}{S_Z}\right] - \Phi\left[\frac{Z_H - m_Z}{S_Z}\right], \quad (1.11)$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ – функция Лапласа, m_Z и S_Z – математическое ожидание и стандартное отклонение параметра состояния Z .

При других законах распределения параметра состояния необходимо производить интегрирование плотности распределения $f(z)$, используя либо численные методы, либо такие приближения, как разложение Шарлье интеграла от плотности вероятности, ряды Лаггера, Эджворта и т.д.

Разработкой математических методов расчета надежности как временной характеристики занимались таких ученых, как Р. Барлоу, А. И. Берг, Н. Г. Бруевич, Б. В. Гнеденко, И. А. Ушаков, В. В. Болотин, В. И. Сифонов, Б. С. Сотсков и др.

Принципиальные положения подхода о сведении определения вероятности неразрушения изделия к вычислению характеристики (индекса) безопасности были разработаны А. Р. Ржаницыным. В дальнейшем исследованиям индекса безопасности и анализу его чувствительности к рассеянию определяющих параметров изделия посвятили свои работы Б. И. Беляев, Б. И. Снарскис, В. Д. Райзер, А. Джонсон (A. Johnson), А. Хасофер (A. M. Hasofer), Н. Линд (N. C. Lind), С. Корнелл (C. A. Cornell), О. Дитлевсен (O. Ditlevsen), Х. Мэдсен (H. O. Madsen), У.-Т. Ву (Y.-T. Wu) и др. [39-46]

Применению вероятностных подходов к оценке надежности элементов ЛА посвящены работы А. А. Кузнецова, М. И. Титова, А. А. Золотова, В. А. Комягина, Е. Б. Волкова, Р. С. Судакова, Т. А. Сырицына, Л. И. Волкова, А. Ф. Селихова, А. М. Шишкевича, В. М. Чижова и др. [32, 35, 38, 47].

Эволюции проблемы надежности в проектировании за рубежом за последние шесть десятилетий посвящен обзор [48], а в работе [49] приведен перечень научных, промышленных и правительственных учреждений европейских стран и США, выполняющих исследования в области развития и применения вероятностной методологии проектирования. В 80-90-х гг. большое внимание этой проблеме уделяли такие организации, как Air Force, NASA Lewis, Southwest Research Institute, Jet Propulsion Laboratory, Rockwell, NYMA, Northrop Grumman.

В основном их отчеты [50], доступные в сети Интернет, посвящены исследованиям металлических и композиционных конструкций, таких как: компоненты самолета-истребителя F-16, учебно-тренировочного самолета Т-38, детали космических двигательных систем (газотурбинных двигателей), компоненты двигательной установки космического корабля Шаттл, крылья самолета-бомбардировщика В-2 и др. В РФ вероятностная методология была разработана и внедрена в ЦАГИ им. Жуковского для проектирования сложных композитных элементов самолетов [51]. Авторы работы [49] полагают, что идеи Cornell [39], Nasofer и Lind [44] (60-70-е гг.), связавшие анализ надежности с принятыми в авиационном строительстве методами проектирования, являются фундаментальной основой вероятностной теории проектирования.

Проблема оценки и обеспечения надежности радиопрозрачных элементов ЛА, изготавливаемых в ОАО «ОНПП «Технология», впервые была затронута в работах В. И. Греченева [52-54]. В основном было уделено внимание технологическому и конструктивному обеспечению надежности изделий, а для оценки показателей надежности использовался классический метод невысечения с нормальным законом распределения.

1.3. Особенности прогнозирования эксплуатационного поведения керамических материалов в элементах ЛА

Вероятностный подход к оценке надежности особенно актуален для изделий из керамических материалов, ввиду таких их особенностей как хрупкость, низкая трещиностойкость, дефектность микроструктуры, статистический разброс показателей механических свойств, масштабный фактор, низкая ударная вязкость. Следовательно, в оценке надежности должны учитываться статистические модели хрупкого разрушения, распределения дефектов различных типов, размеров и местоположений, напряженный объем изделия и т.д. Кроме этого должны быть выявлены параметры, которые вносят наибольший вклад в формирование надежности и оптимизация которых позволит повысить надежность изделия.

Исследованиями конструкционных керамических материалов занимались А. Г. Эванс, Т. Г. Лэнгдон, Ю. Л. Красулин, С. М. Баринов, Ю. Е. Пивинский, А. Г. Ромашин, Е. И. Суздальцев, Ф. Я. Бородай, М. Ю. Русин и др. [6-9, 21, 22, 25-29, 55].

В большинстве случаев разрушения истинно хрупких материалов (керамика, стекло) наилучшее представление результатов испытаний и наиболее надежную основу для экстраполяции дает третье асимптотическое распределение наименьших значений, лежащее в основе модели наислабейшего звена [56-58]. Суть модели заключается в том, что разрушение образца в целом определяется локальной прочностью наиболее слабого элемента объема, т.е. разрушение образца связано с неустойчивым распространением наиболее опасной трещины из этого элемента через весь образец независимо от локальной прочности остальных элементов на пути трещины. Иначе говоря, процесс разрушения образца отождествляется с разрушением цепи, звенья которой образуют элементы объема, и прочность образца в целом определяется прочностью его наислабейшего элемента объема.

Концепция наислабейшего звена широко использовалась при разработке многих статистических теорий прочности. Пирс, сформулировавший эту концепцию при исследовании прочности хлопковых волокон, был одним из первых, кто осознал тесную связь этой модели с асимптотической теорией экстремальных значений при больших выборках из некоторой статистической совокупности. Последняя теория была обобщена Мизесом и Гумбелем.

Применение концепции наислабейшего звена к пространственному телу, а не к волокну, впервые было предложено В. Вейбуллом, пришедшим, однако, к соответствующей функции распределения на основе чисто эвристических соображений, не связанных с асимптотической теорией [56, 57]. Он первым сделал попытку количественного решения вопроса о масштабном факторе прочности, который полностью отрицается классическими соотношениями теории прочности. Теория, разработанная В. Вейбуллом, во многом перекликается с работами Т. А. Конторовой и Я. И. Френкеля, хотя некоторые авторы их подходы не раз-

деляют [58]. Действительно, зависимости вероятности хрупкого разрушения образцов от их объемов (при постоянном напряжении) в обеих теориях, по существу, одинаковы. Однако зависимости этой же вероятности от величины прилагаемого к образцу внешнего усилия совершенно различны.

Впоследствии развитие и практическое применение статистические модели хрупкого разрушения получили в работах В. В. Болотина, С. М. Барина, В. Я. Шевченко, Дж. Квинна (G. Quinn), А. Джаятилака (A. Jajatilaka), К. Труструма (K. Trustrum), Дж. Трантина (G. Trantina), Х. деЛоренци (H. deLorenzi), А. Палужного (A. Paluszny), В. Ву (W. Wu) и др. [13, 59-62]. Актуальными они остаются и на сегодняшний день [63-66].

Наиболее фундаментальные теории разрушения основываются на статистике размеров и расположения дефектов. Так, в работах [60, 65] показано, что распределение предела прочности коррелирует со статистическим распределением дефектов в образцах. Авторами работы [67] на основе представлений линейной механики разрушения установлена аналитически взаимосвязь между параметрами распределения Вейбулла и плотностью распределения критических поверхностных дефектов (пор).

Теория Вейбулла, построенная в предположении равномерного распределения дефектов была распространена в [68] и на случай неоднородного распределения дефектов.

Ф. Мак-Клинтон, исходя из более глубокого анализа статистики разрушения, предложил для описания распределения разрушающих напряжений так называемый метод поэлементной прочности, основанный на предпосылке о том, что тело содержит распределение трещин, каждая из которых характеризуется своим напряжением расширения дефекта (или пределом прочности) [69]. При этом допускалось, что трещины хаотично расположены в пространстве, так что функция распределения разрушающих напряжений может быть установлена исходя из плотности трещин, т.е. числа трещин в единице объема.

А. М. Фрейденталь [56] предложил подход, обычно называемый принципом независимого воздействия (PIA), а именно модель для нахождения вероят-

ности отказа в многомерных полях напряжений, т.к. классическая модель наислабейшего звена не предсказывает поведение материала при многоосном напряжении. Этот принцип устанавливает, что вейбулловская вероятность безотказной работы однородно напряженного элемента материала, испытывающего многоосевую нагрузку, равна произведению вероятностей отказа по каждому из растягивающих главных напряжений, приложенных индивидуально. Теория разрушения PIA является статистическим эквивалентом модели наислабейшего звена с точки зрения теории разрушения по максимальному напряжению. Метод Вейбулла усреднения нормального напряжения при растяжении и модель PIA являются наиболее распространенными методами при анализе многоосных напряжений и широко применяются при проектировании изделий из хрупких материалов [43, 69].

Идеи, развитые С. Батдорфом (S. V. Batdorf) и Дж. Кроузом (J. G. Crose) [70] позволили обеспечить физическое обоснование включения влияния многоосных напряжений в теорию наислабейшего звена. Более точные критерии для предсказания внезапного разрушения при монотонном увеличении нагрузки вытекают из механики разрушения. Многие авторы обсуждали распределение напряжений вокруг пустот различных типов при различных условиях нагрузки, в результате чего были предложены многочисленные критерии для описания возможного разрушения. Б. Пауль (B. Paul) и Л. Миранди (L. Mirandy) [71] расширили критерий Гриффитса для предела прочности при растяжении для двухосных нагрузок, учтя трехмерное влияние с помощью коэффициента Пуассона и геометрии дефекта, которое не могло быть объяснено в двумерном анализе Гриффитса.

Другие исследователи [72, 73] сравнили результаты, полученные с применением наиболее широко принятых критериев разрушения для комбинированных режимов разрушения и различных экспериментальных данных. В результате не выявилось какого-либо преобладающего согласия относительно лучшей теории. Кроме того, большинство критериев дают похожие результаты, несмотря на расхождение начальных предположений. Поэтому, авторы этих исследо-

ваний заключили, что пригодны различные альтернативы, а полуэмпирическое уравнение, разработанное К. Паланисвами (K. Palaniswamy), В. Г. Кнаусс (W. G. Knauss) и Д. К. Шетти (D. K. Shetty) [74, 75], обеспечивает наибольшую гибкость подгонки под доступные экспериментальные данные. Кроме того, критерий Д. К. Шетти может учитывать внеплоскостной рост дефектов, который наблюдается при смешанных нагрузках. Наконец, он обеспечивает учет дефектов, имеющих различную геометрию, хотя для более точного представления дефектов рекомендуются их конфигурации в виде дисковидных или полукруглых трещин соответственно для объемных и поверхностных дефектов.

1.4. Выводы и рекомендации

Анализ публикаций, посвященных проблеме исследования прочностных характеристик керамических материалов и оценке надежности элементов ЛА, показал:

1. Элементы ЛА относятся к ответственным техническим изделиям, к материалам которых предъявляется комплекс повышенных, подчас противоречивых требований по механическим, тепловым, радиотехническим характеристикам и надежности. Однако проблема оценки надежности материалов в изделиях в настоящее время является недостаточно развитой и требует комплексного подхода к решению.

2. Многие исследованные со статистических позиций прочности керамические материалы подчиняются статистическим моделям хрупкого разрушения. В частности, наиболее используемой является модель наислабейшего звена Вейбулла, позволяющая получить ряд прогнозов относительно разрушения натуральных керамических изделий по напряжениям разрушения, экспериментально полученным на образцах материала. Необходимы теоретические и экспериментальные исследования возможного применения данной модели к прогнозированию вероятности разрушения рассматриваемых элементов ЛА.

3. Радиопрозрачные элементы ЛА оболочечного типа, несмотря на кажущуюся простоту, имеют ряд особенностей, обусловленных спецификой кера-

мической технологии, приводящей к начальной дефектности микроструктуры керамики и рассеянию свойств, сложными конструктивными решениями соединения керамической оболочки с металлическим шпангоутом, случайной природой условий эксплуатации (сложные природно-климатические условия, экстремальные температуры и их перепады, аэродинамические и иные нагрузки) и т.д. В связи с этим необходима разработка физико-статистической модели оценки вероятности разрушения изделий с учетом вышеперечисленных их особенностей и на основе объединения достижений по исследованию стохастической природы несущей способности и условий эксплуатации. Данная физико-статистическая модель позволит существенно повысить качественные характеристики расчетов, сократить временные затраты, а также заранее заложить в разрабатываемое изделие требуемую надежность.

4. Высшим современным уровнем развития наукоемких технических изделий является применение в их производстве вероятностно-статистических методов оценки и контроля качества технологических процессов. Поэтому весьма актуальным является разработка и внедрение в производственную практику элементов ЛА из керамических материалов строго поэтапного аналитического подхода к решению статистических проблем по минимизации отклонений основных технологических параметров, свойств материалов и характеристик изделий в установленных допусках, базирующегося на общепризнанной мировой методологии «шесть сигм».

ГЛАВА 2. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ЭЛЕМЕНТАХ ЛА С ПОЗИЦИИ МОДЕЛЕЙ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ

2.1. Модель наислабейшего звена Вейбулла

Статистический подход к хрупкому разрушению сводится к двум проблемам: задаче о функции распределения показателей хрупкой прочности номинально идентичных образцов в номинально идентичных условиях и задаче о влиянии на показатели хрупкой прочности размера изделия и напряженного состояния.

Существующие в настоящее время статистические подходы к построению теории прочности можно разделить на две основные группы, в которых принимается следующее:

1) тело состоит из элементов различной (случайной) прочности, не изменяющейся в процессе взаимодействия элементов и деформирования тела (прочность тела в целом определяется прочностью его наиболее слабого элемента);

2) тело является микронеоднородной средой, и его прочность определяется относительным числом (величиной вероятности) разрушенных микроэлементов по определенному сечению или по всевозможным направлениям в некоторой «физической» точке.

Исследования, базирующиеся на этих подходах, можно разбить на такие, в которых источники разрушения – дефекты структуры – явно не учитываются или учитываются.

Под *пределом хрупкой прочности* тела объемом V будем понимать в дальнейшем величину разрушающих напряжений σ . Для случая однородного напряженного состояния приведенное напряжение при справедливости гипотезы наибольших относительных удлинений равно

$$\sigma = \sigma_1 - \mu(\sigma_2 - \sigma_3), \quad (2.1)$$

где μ – коэффициент Пуассона, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ – главные напряжения.

При справедливости гипотезы прочности Мора приведенное напряжение равно

$$\sigma = \sigma_1 - \tilde{m}\sigma_3, \quad (2.2)$$

где \tilde{m} – константа. Если напряженное состояние неоднородно, то будем считать, что оно задано с точностью до множителя S , имеющего размерность напряжений,

$$\sigma = Sf(x, y, z), \quad (2.3)$$

где $f(x, y, z)$ – некоторая безразмерная функция координат точки.

Тогда если n – среднее число дефектов в единице объема, $F(\sigma)$ – функция распределения дефектов, равная вероятности обнаружить дефектный элемент, местный предел прочности которого меньше, чем σ , и учитывая, что в теле имеется nV дефектов, а разрушение произойдет, если напряжение σ окажется больше, чем минимальный предел прочности в совокупности nV дефектов, функция распределения пределов прочности тела $F_V(\sigma)$ при однородном напряженном состоянии будет равна [57]

$$F_V(\sigma) = 1 - [1 - F(\sigma)]^{nV}. \quad (2.4)$$

При большом числе дефектов уравнение (2.4) может быть заменено его асимптотическим представлением, которое следует из теоремы о распределении минимальных значений [58],

$$F_V(\sigma) \approx 1 - \exp[-cnV(\sigma - \sigma_0)^m], \quad (2.5)$$

где σ_0 – минимальное значение предела прочности дефектного элемента, при котором вероятность разрушения равна нулю (в предельном случае $\sigma_0 \rightarrow 0$); c и m – константы.

Последнее уравнение может быть переписано в виде

$$P(\sigma) = F_V(\sigma) = 1 - \exp\left[-\frac{V}{V_0}\left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_c}\right)^m\right], \quad (2.6)$$

где V_0 – единичный объем (например, объем стандартного образца); σ_c – константа, связанная с cn как $cn = \frac{1}{V_0 \sigma_c^m}$.

В случае неоднородного напряженного состояния вероятность разрушения объема V может быть определена через микрообъемы ΔV_k , достаточно малые для того, чтобы напряженное состояние в каждом из них можно было считать почти однородным

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left[-\frac{1}{V_0} \sum_k \Delta V_k \left(\frac{\sigma_k - \sigma_0}{\sigma_c} \right)^m \right] = 1 - \exp \left[-\frac{1}{V_0} \int_{\sigma > \sigma_0} \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_c} \right)^m dV \right]. \quad (2.7)$$

Уравнения (2.6) и (2.7), называемые *распределениями Вейбулла*, позволяют оценить вероятность разрушения тела при напряжении равном или меньшем σ с учетом величины объема и степени неравномерности напряжений в теле. Этим они отличаются от стандартизированного распределения Вейбулла [58], используемого в прикладной статистике, и в самом общем виде записываются как

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left[- \int \int \int_{\Omega} \left(\frac{\sigma(x, y, z) - \sigma_0}{\sigma_c} \right)^m dx dy dz \right]. \quad (2.8)$$

Здесь $\sigma(x, y, z)$ – значение максимального напряжения как функция координат; Ω – область тела, в которой $\sigma > \sigma_0$; σ_0 – *параметр положения*, представляющий собой нижнюю границу предела прочности; σ_c – *параметр масштаба* (напряжение, при котором вероятность разрушения равна 63,2%); m – *параметр формы* (модуль Вейбулла).

Оценки среднего значения и стандартного отклонения предела прочности изделия объемом V , описываемого трехпараметрическим распределением Вейбулла (2.6), имеют следующий вид [58]

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= \sigma_0 + \sigma_c \left(\frac{V_0}{V} \right)^{1/m} \Gamma(1 + 1/m), \\ S_{\sigma} &= \sigma_c \left(\frac{V_0}{V} \right)^{1/m} \sqrt{\Gamma(1 + 2/m) - \Gamma^2(1 + 1/m)}, \end{aligned} \quad (2.9)$$

где $\Gamma(z) = \int_0^{\infty} x^{z-1} e^{-x} dx$ – гамма-функция. В случае оценки среднего значения и стандартного отклонения предела прочности образцов $V_0/V = 1$.

Параметр формы m часто рассматривается как мера объемной плотности трещин (в теории Вейбулла m называется показателем объемной плотности повреждений). В работе [67] доказывается, что m является мерой однородности распределения дефектов: чем больше m , тем ближе распределение размеров дефектов к однородному и тем меньше, поэтому, влияние объемной плотности дефектов. Малые величины m соответствуют материалам, содержащим дефекты, опасность которых изменяется в широких пределах. Это является результатом принятия концепции наислабейшего звена.

Параметры распределения Вейбулла (m, σ_0, σ_c) существенно изменяются с изменением состояния поверхности образцов, термообработки, температуры испытаний. Следовательно, эти величины не являются истинными константами материала, а представляют собой лишь параметры, характеризующие данную партию материала и данный комплекс условий испытаний.

В работе [76] установлено, что параметры трехпараметрического распределения Вейбулла, более значительно варьируют от выборки к выборке, чем параметры двухпараметрического распределения. Кроме этого, согласно большинству оценок, пороговое напряжение σ_0 мало по сравнению со средним напряжением разрушения, и до тех пор, пока отсутствуют физические основания для установления верхнего предела размера дефекта, пороговое напряжение следует принимать равным нулю. Тогда из уравнения (2.7) при $\sigma_0 = 0$ получим

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left[- \frac{1}{V_0} \int_V \left(\frac{\sigma}{\sigma_c} \right)^m dV \right] = 1 - \exp \left[- k \frac{V}{V_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_c} \right)^m \right], \quad (2.10)$$

где k – коэффициент нагрузки.

Коэффициент нагрузки k в выражении (2.10) представляет собой меру равномерности распределения напряжений и определяется как [61]

$$k = \int_V \left(\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} \right)^m \frac{dV}{V}, \quad (2.11)$$

где σ_{\max} – максимальное растягивающее напряжение в объеме V .

Для различных схем испытаний образцов материала значения k представлены в табл. 2.1. Что касается коэффициента нагрузки конструкций, то в литературе имеются его значения для некоторых изделий. Однако для конструкций, как правило, отдельно не вычисляют k , а при анализе напряженно-деформированного состояния находят объем, подверженный растягивающим напряжениям, называемый *эффективным (напряженным) объемом* V_{ef} , который равен произведению коэффициента нагрузки на полный объем.

Таблица 2.1 – Коэффициент нагрузки

Вид испытаний	Значение k
Равномерное растяжение	1
Чистый изгиб (равномерное распределение напряжений)	$\frac{1}{2(m+1)}$
3-х точечный изгиб	$\frac{1}{2(m+1)^2}$
4-х точечный изгиб	$\frac{m+2}{4(m+1)^2}$

Описание результатов испытаний образцов, вырезанных из технологического припуска оболочек двух видов изделий, изготовленных из кварцевой керамики НИАСИТ и стеклокерамики ОТМ-357 в течение одного года, на трехточечный изгиб двухпараметрическим распределением Вейбулла (2.10) представлено на рис. 2.1 и 2.2 соответственно. На рис. 2.1А и 2.2А изображены эмпирические гистограммы предела прочности при изгибе σ_u совместно с теоретической плотностью распределения Вейбулла и Гаусса (нормальный закон); на рис. 2.1Б и 2.2Б – экспериментальные данные в координатной сетке Вейбулла.

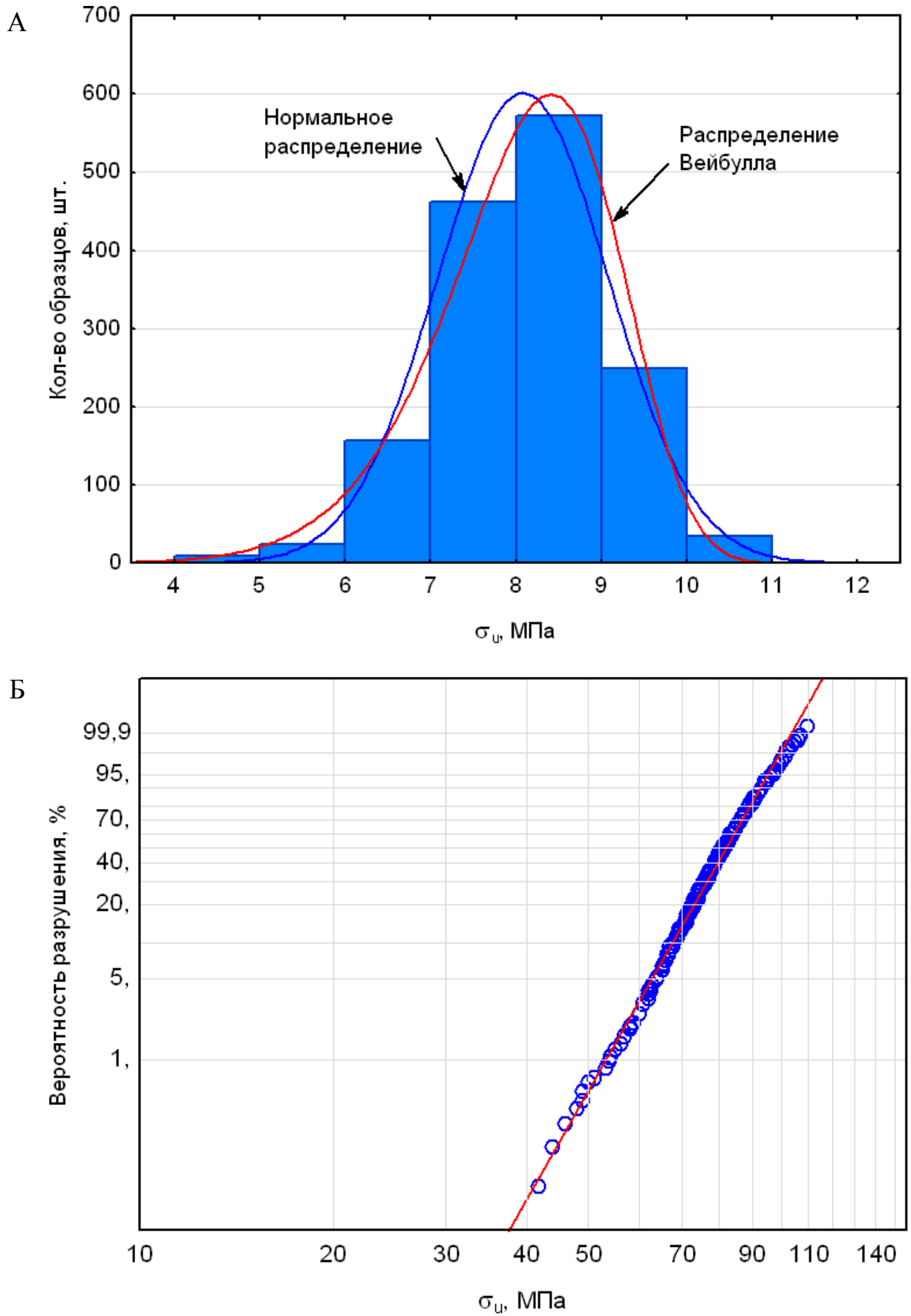


Рис. 2.1 Распределения предела прочности при трехточечном изгибе образцов материала НИАСИТ (А – гистограмма, Б – координатная сетка Вейбулла)

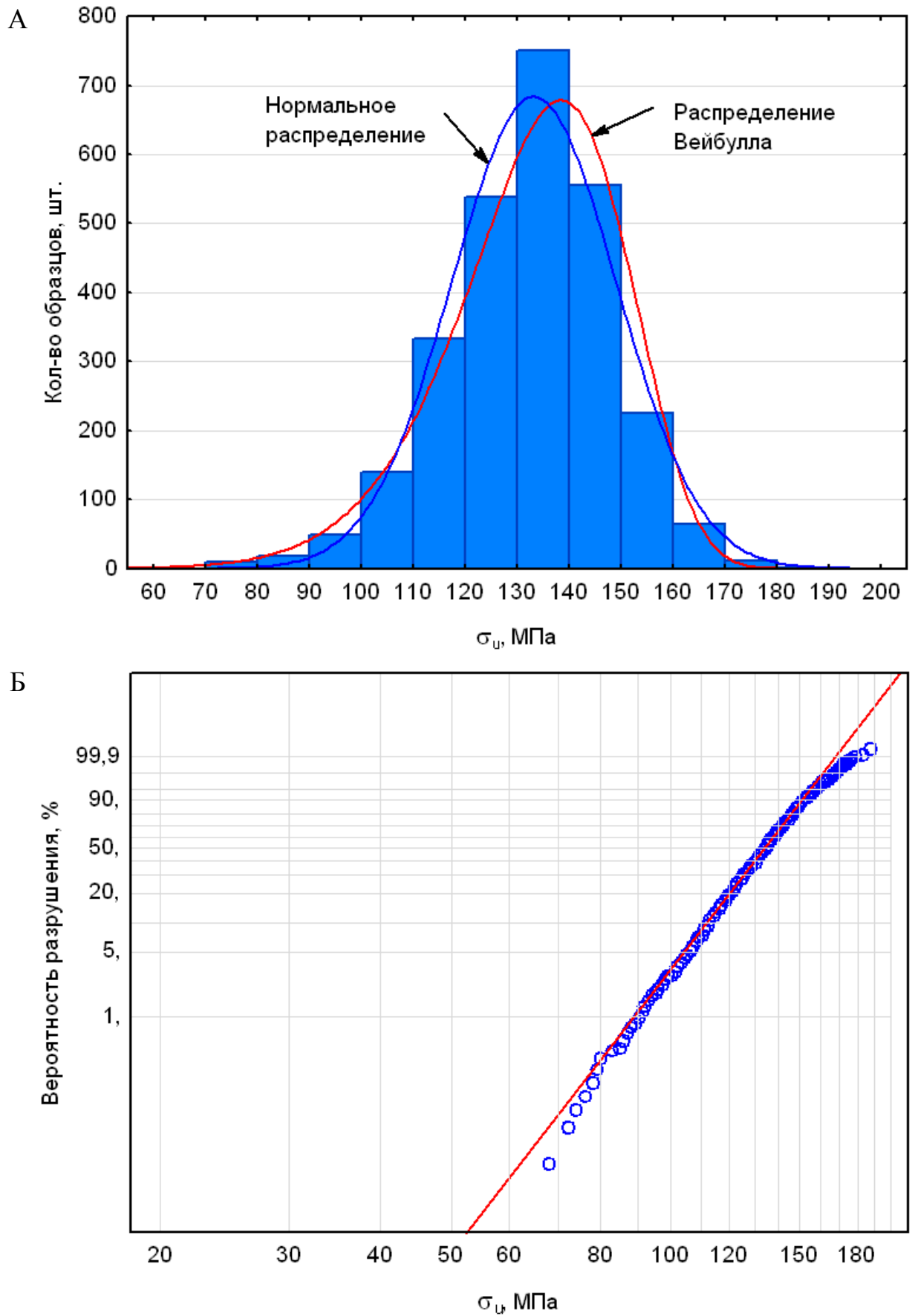


Рис. 2.2 Распределения предела прочности при трехточечном изгибе образцов материала ОТМ-357 (А – гистограмма, Б – координатная сетка Вейбулла)

Предел прочности при трехточечном изгибе, согласно принятой в ОАО «ОНПП «Технология» методики, определяли как

$$\sigma_u = \frac{3Fl}{2bh^2}, \quad (2.12)$$

где F – критическая нагрузка; l – расстояние между опорами; b и h – ширина и длина образца.

Следует отметить, что описание предела прочности при изгибе распределением Вейбулла (2.10), в которое входит предел прочности при растяжении, возможно только при корректном пересчете коэффициента нагрузки, выступающего в качестве корректирующего множителя, связывающего прочностные показатели при разных видах деформации.

Критерии согласия Манна и Холландера-Прошана [31] не отвергают на уровне значимости $p > 0,60$ применение распределения Вейбулла для описания результатов прочностных испытаний образцов обоих материалов. Для нормального закона распределения уровни значимости также больше 0,60 по критерию согласия Колмогорова-Смирнова с поправкой Лиллиефорса, т.е. нормальный закон распределения тоже применим в прогнозировании вероятности разрушения, однако, поскольку он не позволяет учесть физические аспекты хрупкого разрушения керамики и теоретически допускает существование отрицательных значений предела прочности, он менее предпочтителен по сравнению с распределением Вейбулла.

Статистические параметры σ_u анализируемых выборок образцов материалов совместно с оценками параметров распределения Вейбулла, полученными по методу максимального правдоподобия, представлены в табл. 2.2. Несмотря на разные уровни средних пределов прочности и коэффициентов вариации, модули Вейбулла практически одинаковы (9,14 и 9,49 для НИАСИТ и ОТМ-357 соответственно), что свидетельствует об одинаковой степени однородности структуры материалов данных выборок образцов.

Таблица 2.2 – Статистические параметры предела прочности при трехточечном изгибе и оценки параметров распределения Вейбулла

Параметры		Материал	
		НИАСИТ	ОТМ-357
Количество образцов	N , шт	1508	2698
Среднее значение	$\bar{\sigma}_u$, МПа	80,8	132,8
Стандартное отклонение	S_σ , МПа	10,0	15,7
Коэффициент вариации	CV_σ , %	12,4	2,5
Минимальное значение	Min, МПа	42,0	72,0
Максимальное значение	Max, МПа	110,0	187,0
Размах	R_σ , МПа	68,0	115,0
Нижний 95%-ный доверительный интервал	$\sigma_{-95\%}$, МПа	80,3	132,2
Верхний 95%-ный доверительный интервал	$\sigma_{+95\%}$, МПа	81,3	133,4
Ассиметрия	Sk_σ	0,35	0,37
Экцесс	Ex_σ	0,42	0,05
Модуль Вейбулла	m	9,14	9,49
Асимптотич. станд. ошибка оценки m	Δm	0,18	0,13
Параметр масштаба	σ_c , МПа	85,1	139,60
Асимптотич. станд. ошибка оценки σ_c	$\Delta \sigma$, МПа	0,03	0,03

2.1.1. Методы оценки параметров модели

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 ми-

нимально необходимого объема выборки, позволяющего получить оценки параметров с заданной точностью.

Для оценки параметров Вейбулла (m, σ_c) используются графические (метод наименьших квадратов), аналитические (методы моментов, квантилей, максимального правдоподобия), графоаналитические и приближенные методы [77, 78].

Метод наименьших квадратов (МНК) является особым случаем метода максимального правдоподобия (ММП), когда ошибка оценки имеет нормальное распределение с нулевым средним и постоянной дисперсией. Данный метод довольно прост и основывается на представлении данных по хрупкой прочности на вероятностной бумаге путем двукратного логарифмирования выражения (2.10), которое приводит к линейаризации

$$\ln \ln \frac{1}{1 - P(\sigma)} = m \ln \sigma - m \ln \sigma_c. \quad (2.13)$$

По МНК получают прямую линию, наилучшим образом аппроксимирующую это уравнение, с наклоном, равным m , и точкой пересечения с осью ординат, равной $m \ln \sigma_c$. Параметр положения σ_0 (если он не равен нулю) подбирается методом последовательных приближений. Обязательным является проверка наличия выбросов в экспериментальных данных.

ММП более предпочтителен для оценки m и σ_c , поскольку уравнения, вытекающие из этого метода и позволяющие получить оценки, имеют единственное решение. Кроме того, с увеличением объема выборки, решение сходится к истинным значениям параметров. Другой особенностью этого метода является вычисление доверительных интервалов оценок, количественно определяющих статистическую достоверность данных.

Уравнение правдоподобия записывается в виде

$$L = \prod_{i=1}^n \left(\frac{m}{\sigma_c} \right) \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_c} \right)^{m-1} e^{-\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_c} \right)^m}. \quad (2.14)$$

Оценки \hat{m} и $\hat{\sigma}_c$, максимизирующие функцию правдоподобия L , определяются из частных производных ее логарифма по параметрам m и σ_c .

Основная идея непараметрического оценивания (метод моментов (ММ) и квантилей) состоит в том, что моменты (квантили) распределения, зависящие от неизвестных параметров, приравниваются эмпирическим моментам (квантилям). Взяв число моментов (квантилей), равное числу неизвестных параметров, и составив соответствующие уравнения, можно определить искомые оценки.

Графоаналитический метод заключается в построении графиков зависимости параметров распределения от значений математического ожидания, стандартного отклонения и моды распределения и используется обычно для получения приближенных оценок.

Приближенные методы базируются на выводе приближенных эмпирических формул, пригодных для расчетов в каждом конкретном случае. Такие оценки, как правило, довольно грубые и зависят от величины параметров и объема выборок.

В [16] приведен обзор работ, посвященных выбору наилучшего метода оценки параметров Вейбулла. Отмечено в этой связи, большое значение компьютерного моделирования из-за дорогостоящих испытаний керамики. В диссертации рассмотрены три метода – МНК, ММП и ММ для оценки параметров распределения Вейбулла для значений пределов прочности, полученных путем моделирования по методу Монте-Карло.

Для анализа было смоделировано 30 выборок по 100 значений пределов прочности каждая¹. В качестве истинных значений параметров взяты $\tilde{m}=12$, $\tilde{\sigma}_c=75$ МПа для кварцевой керамики НИАСИТ и $\tilde{m}=10$, $\tilde{\sigma}_c=125$ МПа для стеклокерамики ОТМ-357².

¹ Данный материал опубликован в [79].

² Истинные значения параметров Вейбулла представляют собой оценки параметров, наиболее часто получаемые по результатам испытаний на трехточечный изгиб стандартных образцов исследуемых материалов за предыдущие годы.

Для построения эмпирической функции распределения использован метод медианного ранга, в котором

$$\hat{F}(\sigma) = \frac{i - 0,3}{n + 0,4}, \quad (2.15)$$

где $\hat{F}(\sigma)$ – оценка функции распределения, i – порядковый номер члена вариационного ряда, n – количество его членов.

Оценки, полученные разными методами, сравнивали по величинам ошибок соответственно для m и σ_c

$$\delta_m = \left| \frac{\tilde{m} - \bar{m}}{\tilde{m}} \right|, \quad \delta_{\sigma_c} = \left| \frac{\tilde{\sigma}_c - \bar{\sigma}_c}{\tilde{\sigma}_c} \right|, \quad (2.16)$$

где \bar{m} , $\bar{\sigma}_c$ – средние значения параметров по всем выборкам.

В табл. 2.3 приведены статистические параметры оценок m и σ_c и соответствующие значения ошибок.

Как видно из представленных в таблице данных, коэффициенты вариации модуля Вейбулла на порядок больше, чем масштабного параметра, а ММП дает меньшие их значения – в среднем на 25% по сравнению с другими методами.

В порядке уменьшения ошибок δ_m , δ_{σ_c} в трех из четырех случаев методы располагаются следующим образом: 1) ММП, 2) ММ, 3) МНК и только для δ_m материала НИАСИТ наименьшую оценку дает ММП, а наибольшую МНК.

Таким образом, основываясь на проведенном исследовании, можно рекомендовать графический метод (МНК) как наиболее простой в реализации и дающий наименьшие ошибки оценок параметров и ММП для нахождения не только оценок, но и их доверительных границ.

Таблица 2.3 – Статистические параметры оценок параметров Вейбулла

Метод	Параметр	НИАСИТ		ОТМ-357	
		m	σ_c , МПа	m	σ_c , МПа
МНК	Среднее значение	11,559	75,02	9,900	124,79
	Станд. отклонение	1,265	0,76	1,216	1,62
	Коэф. вариации, %	10,946	1,011	12,287	1,299
	Min	8,445	73,62	7,008	121,94
	Max	14,464	76,62	12,334	128,65
	$\delta_m, \delta_{\sigma_c}$	0,0367	0,0002	0,0100	0,0017
ММП	Среднее значение	12,104	74,92	10,347	124,59
	Станд. отклонение	0,900	0,76	1,039	1,60
	Коэф. вариации, %	7,437	1,014	10,046	1,284
	Min	9,956	73,36	8,933	121,83
	Max	14,158	76,58	12,702	128,52
	$\delta_m, \delta_{\sigma_c}$	0,0087	0,0011	0,0347	0,0033
ММ	Среднее значение	11,808	74,98	10,112	124,71
	Станд. отклонение	1,285	0,76	1,238	1,62
	Коэф. вариации, %	10,887	1,011	12,245	1,297
	Min	8,635	73,56	7,183	121,87
	Max	14,762	76,58	12,569	128,58
	$\delta_m, \delta_{\sigma_c}$	0,0160	0,0003	0,0112	0,0023

2.1.2. Объем выборки для оценки параметров модели

Оценки параметров Вейбулла зависят не только от метода оценивания, но даже в большей степени от объема выборок [13, 16]. Для проверки этого заключения было сгенерировано 30 выборок разного размера от 5 до 1000 значений.

На рис. 2.3 и 2.4 приведены соответственно средние значения и стандартные отклонения модуля Вейбулла и параметра масштаба в зависимости от размера выборки. Были найдены также ошибки оценок $\delta_m, \delta_{\sigma_c}$.

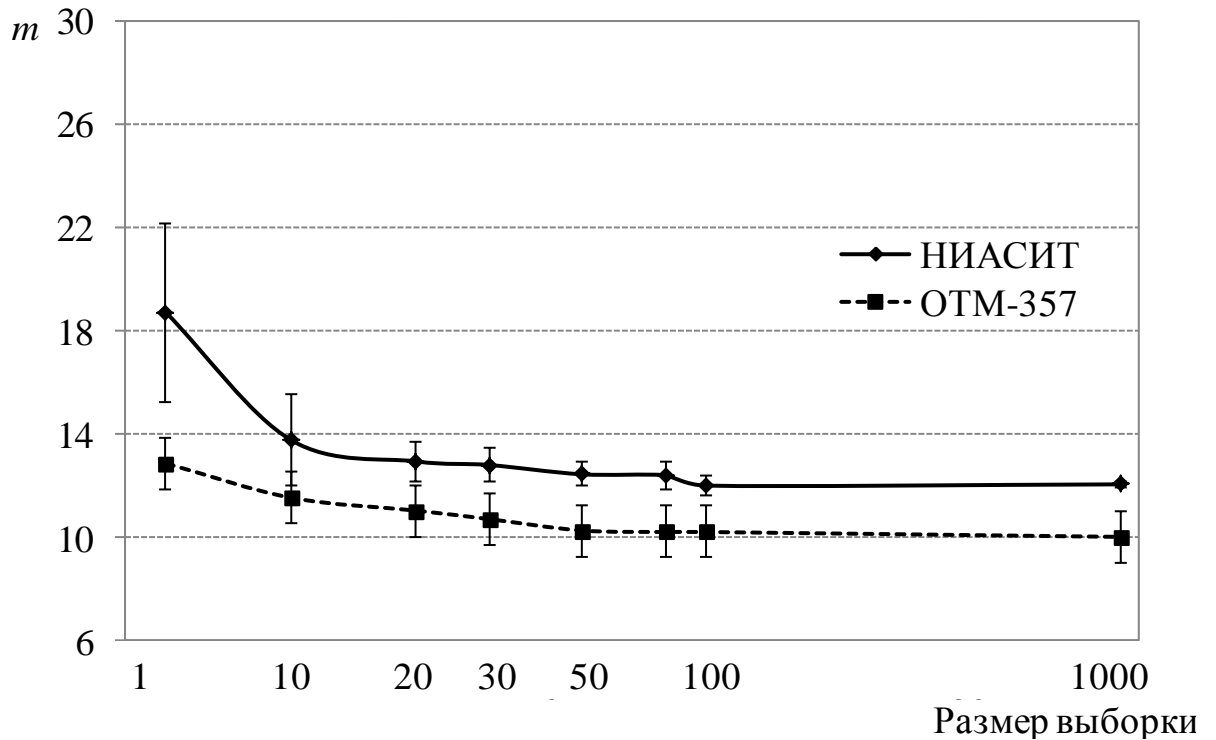


Рис. 2.3 Средние значения и 95%-ный доверительный интервал оценок модуля Вейбулла НИАСИТ и ОТМ-357 в зависимости от размера выборки

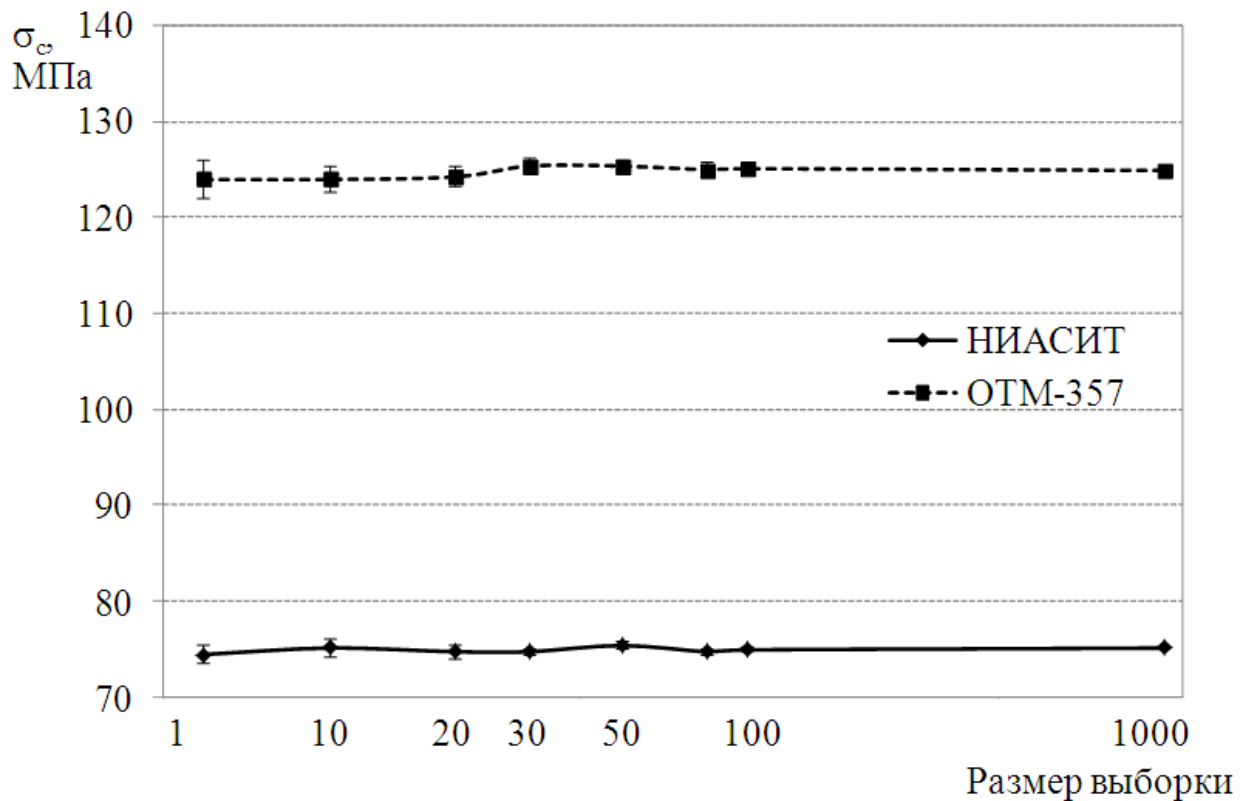


Рис. 2.4 Средние значения и 95%-ный доверительный интервал оценок параметра масштаба НИАСИТ и ОТМ-357 в зависимости от размера выборки

Так, при $n = 10$ ошибка δ_m составляет 14,6% и 15,1% соответственно для НИАСИТа и ОТМ-357, при $n = 30$ – 6,5% и 6,8%, а для $n = 50$ – 3,5% и 2,4%. Оценки параметра масштаба от размера выборок практически не зависят.

Задаваясь ошибками оценок, можно оценить необходимый объем выборки по формуле

$$n = \frac{CV_m^2}{\delta_m^2} z_{1-\alpha/2}^2, \quad (2.17)$$

где CV – коэффициент вариации параметра; $z_{1-\alpha/2}$ – квантиль уровня $(1-\alpha/2)$ нормированной нормально распределенной случайной величины.

Для оценки модуля Вейбулла с ошибкой δ_m не превышающей 5% необходимый объем выборок составляет 30 образцов с доверительной вероятностью $\alpha = 95\%$ для обоих материалов.

95%-ный доверительный интервал $d_{0,95}$ для среднего значения предела прочности, изображенный на рис. 2.5 как функция размера выборки, существенно уменьшается с увеличением объема выборки, т.е. уменьшается вероятность ошибки оценки истинного значения предела прочности.

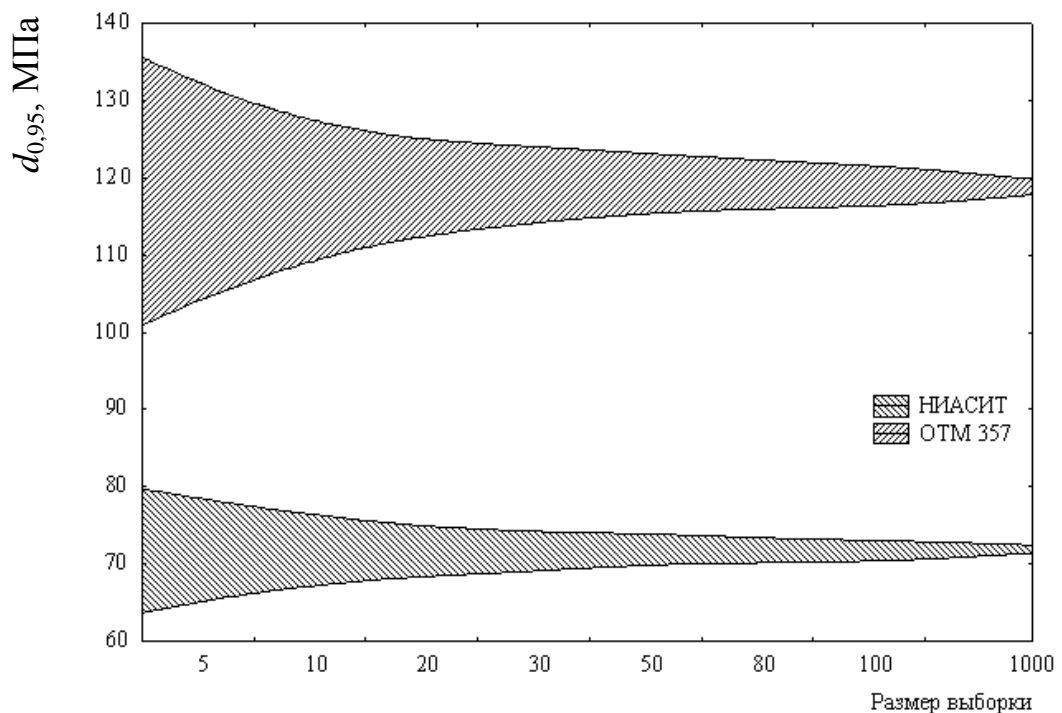


Рис. 2.5 Доверительные интервалы оценок пределов прочности исследуемых материалов в зависимости от размера выборки

Ошибки оценки параметров m и σ_c вносят существенные неточности в оценку допустимых растягивающих напряжений в изделии, а, следовательно, и в оценку коэффициента запаса прочности.

На рис. 2.6 в качестве примера для двух изделий ЛА из кварцевой и стеклокерамики с эффективными объемами $0,75 \cdot 10^{-3}$ и $0,13 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ и σ_{\max} , равными 14 и 19 МПа соответственно, графически показан прогнозируемый коэффициент запаса прочности.

Абсолютные погрешности $\Delta\eta$ (рис. 2.6 А), равные стандартному отклонению среднего, и относительные погрешности δ_η (рис. 2.6 Б), найдены по уравнению

$$\delta_\eta = \frac{\Delta\eta}{\bar{\eta}} = \frac{1}{\bar{\eta}} \sqrt{\left(\frac{\partial\eta}{\partial m}\right)^2 (\Delta m)^2 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial \sigma_c}\right)^2 (\Delta\sigma_c)^2}, \quad (2.18)$$

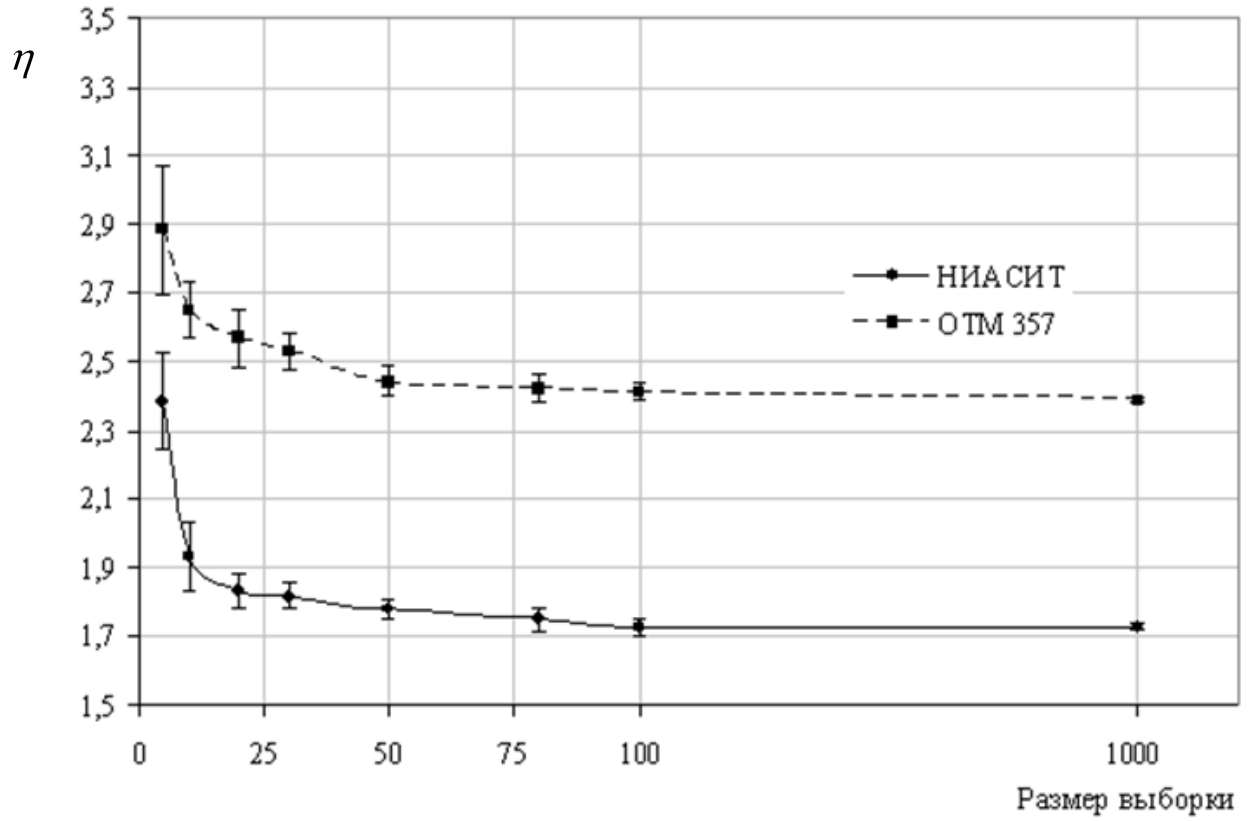
где $\bar{\eta}$ – среднее значение коэффициента запаса прочности; $\Delta m, \Delta\sigma_c$ – абсолютные погрешности оценок m и σ_c . Производные η по параметрам Вейбулла вычисляли следующим образом

$$\begin{aligned} \frac{\partial\eta}{\partial m} = \frac{\sigma_c}{\sigma_{\max}} & \left[\Gamma' \left(1 + \frac{1}{m}\right) \left(\frac{V_u}{V_{ef}}\right)^{1/m} \left(\frac{1}{2(m+1)^2}\right)^{1/m} + \Gamma \left(1 + \frac{1}{m}\right) \ln \left(\frac{V_u}{V_{ef}}\right) \left(\frac{V_u}{V_{ef}}\right)^{1/m} \times \right. \\ & \times \left(\frac{-1}{m^2}\right) \left(\frac{1}{2(m+1)^2}\right)^{1/m} + \Gamma \left(1 + \frac{1}{m}\right) \left(\frac{V_u}{V_{ef}}\right)^{1/m} \left(\frac{1}{2(m+1)^2}\right)^{1/m} \times \\ & \left. \times \left[\ln \left(\frac{1}{2(m+1)^2}\right) \left(\frac{-1}{m^2}\right) - \frac{2}{m(m+1)} \right] \right], \quad (2.19) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial\eta}{\partial \sigma_c} = \frac{1}{\sigma_{\max}} \Gamma \left(1 + \frac{1}{m}\right) \left(\frac{V_u}{V_{ef}}\right)^{1/m} \left(\frac{1}{2(m+1)^2}\right)^{1/m}, \quad (2.20)$$

где $\Gamma'(\cdot)$ – производная гамма-функции по параметру, V_u – объем образца для испытаний на изгиб.

А



Б

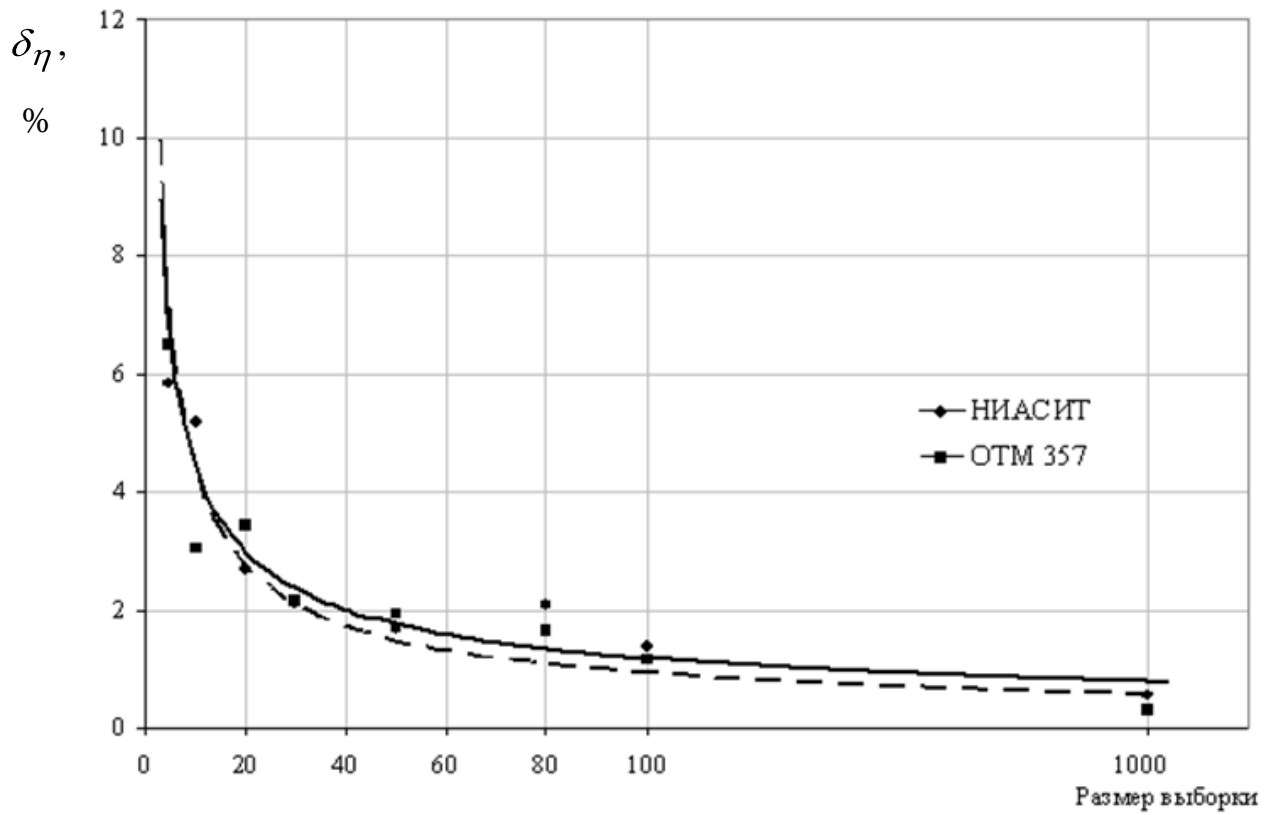


Рис. 2.6 Оценки коэффициента запаса прочности (А) и их относительные погрешности (Б) двух керамических изделий в зависимости от размера выборки

Значения коэффициента запаса вследствие завышенных значений модуля Вейбулла оказываются завышенными на выборках малого размера и стабилизируются при увеличении числа испытаний. Погрешности δ_η находятся на уровне 10 % для малых выборок и далее убывают по степенному закону. Однако, даже такая их величина, как видно из графиков на рис. 2.7, приводит к оценкам надежности изделий с большими погрешностями. Относительную погрешность δ_R , изображенную на рис. 2.8, находили как

$$\delta_R = \frac{\Delta R}{\hat{R}} = \frac{1}{\hat{R}} \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial m}\right)^2 (\Delta m)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \sigma_c}\right)^2 (\Delta \sigma_c)^2}, \quad (2.21)$$

где \hat{R} – оценка надежности; ΔR – абсолютная погрешность оценки надежности.

Производные $\frac{\partial R}{\partial m}$, $\frac{\partial R}{\partial \sigma_c}$ есть

$$\frac{\partial R}{\partial m} = \exp \left[-2 \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_c \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right)} \right)^m \frac{V_{ef}}{V_u} (m+1)^2 \right] \left[\left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_c \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right)} \right)^m \frac{V_{ef}}{V_u} \left\{ \ln \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_c \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right)} \right) - m \frac{\Gamma' \left(1 + \frac{1}{m} \right)}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right)} \right\} \frac{V_{ef}}{V_u} 2(m+1)^2 + 4(m+1)^2 \right], \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial R}{\partial \sigma_c} = -\exp \left[-2 \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_c \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right)} \right)^m \frac{V_{ef}}{V_u} (m+1)^2 \right] \frac{m}{\sigma_c} \frac{V_{ef}}{V_u} (m+1)^2. \quad (2.23)$$

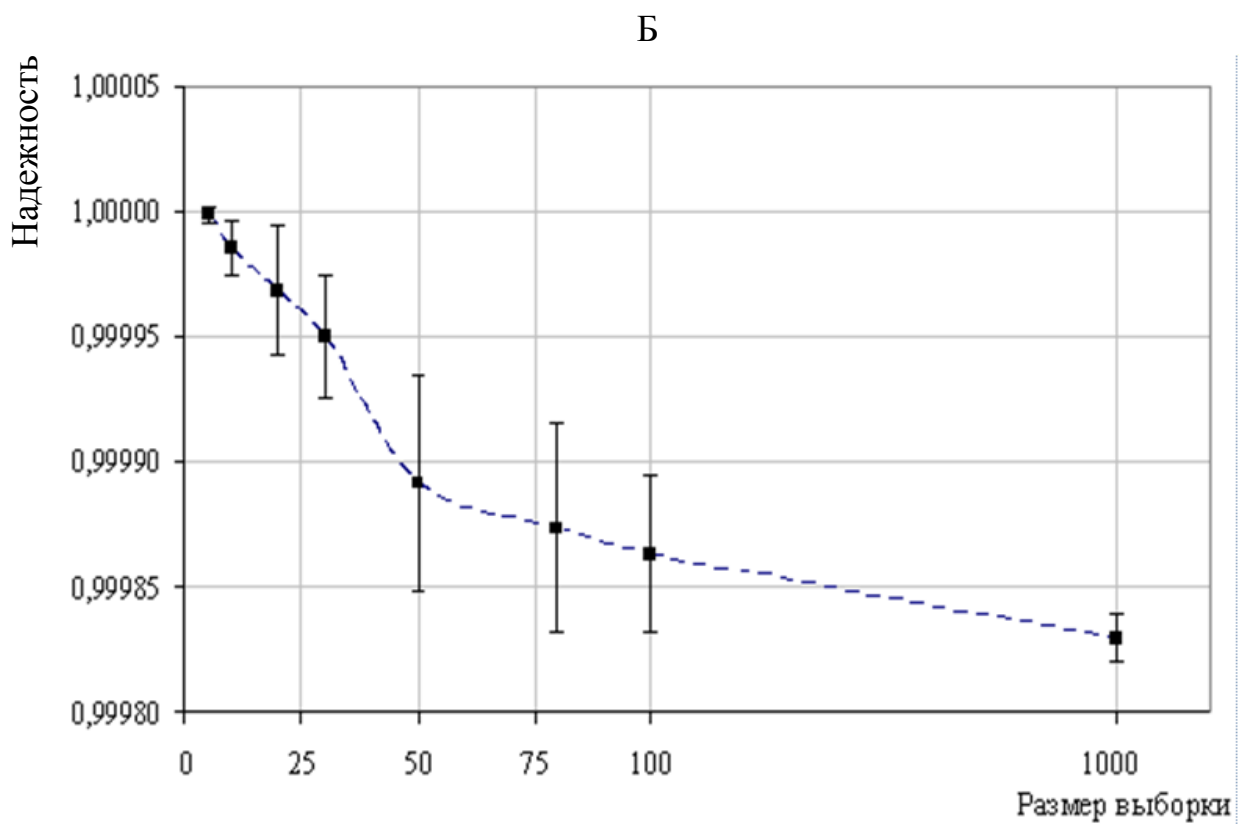
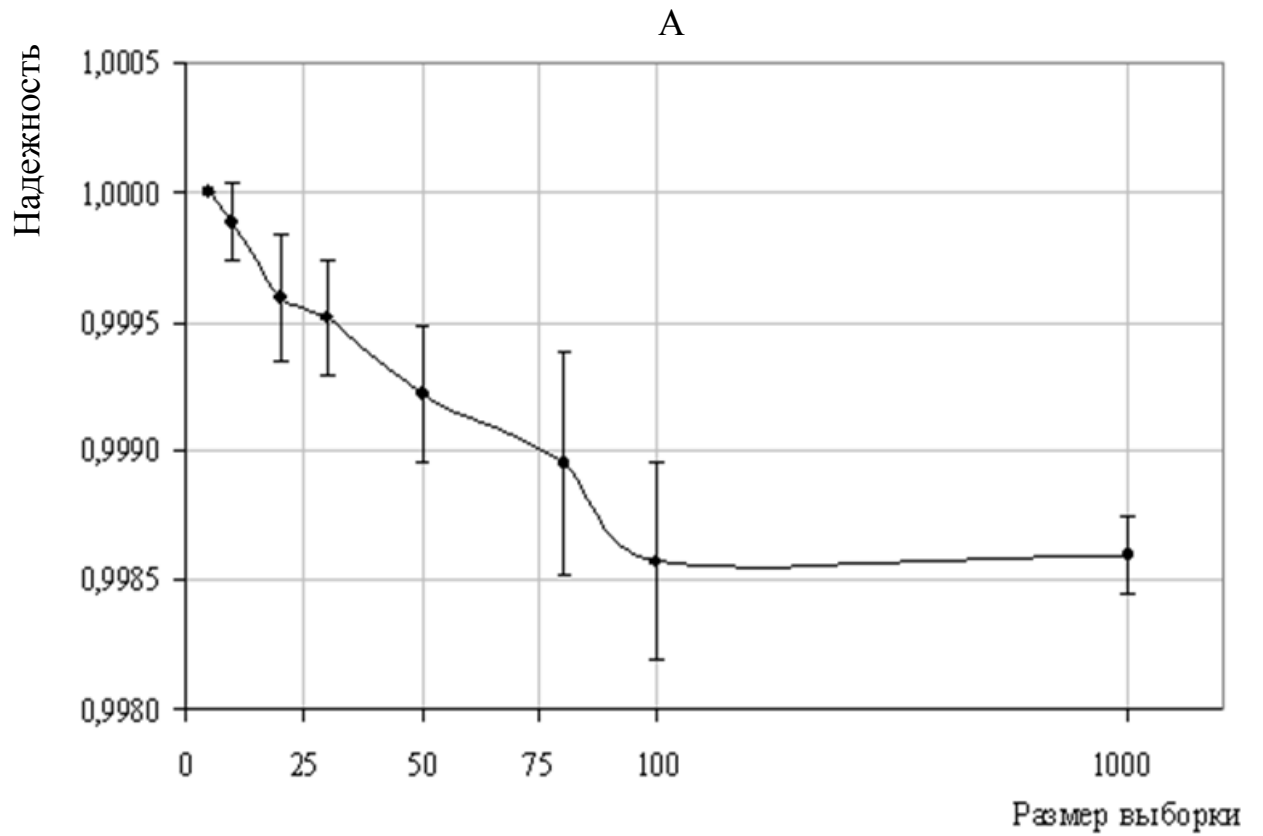


Рис. 2.7 Оценки надежности двух изделий из материалов НИАСИТ (А) и ОТМ-357 (Б) в зависимости от размера выборки

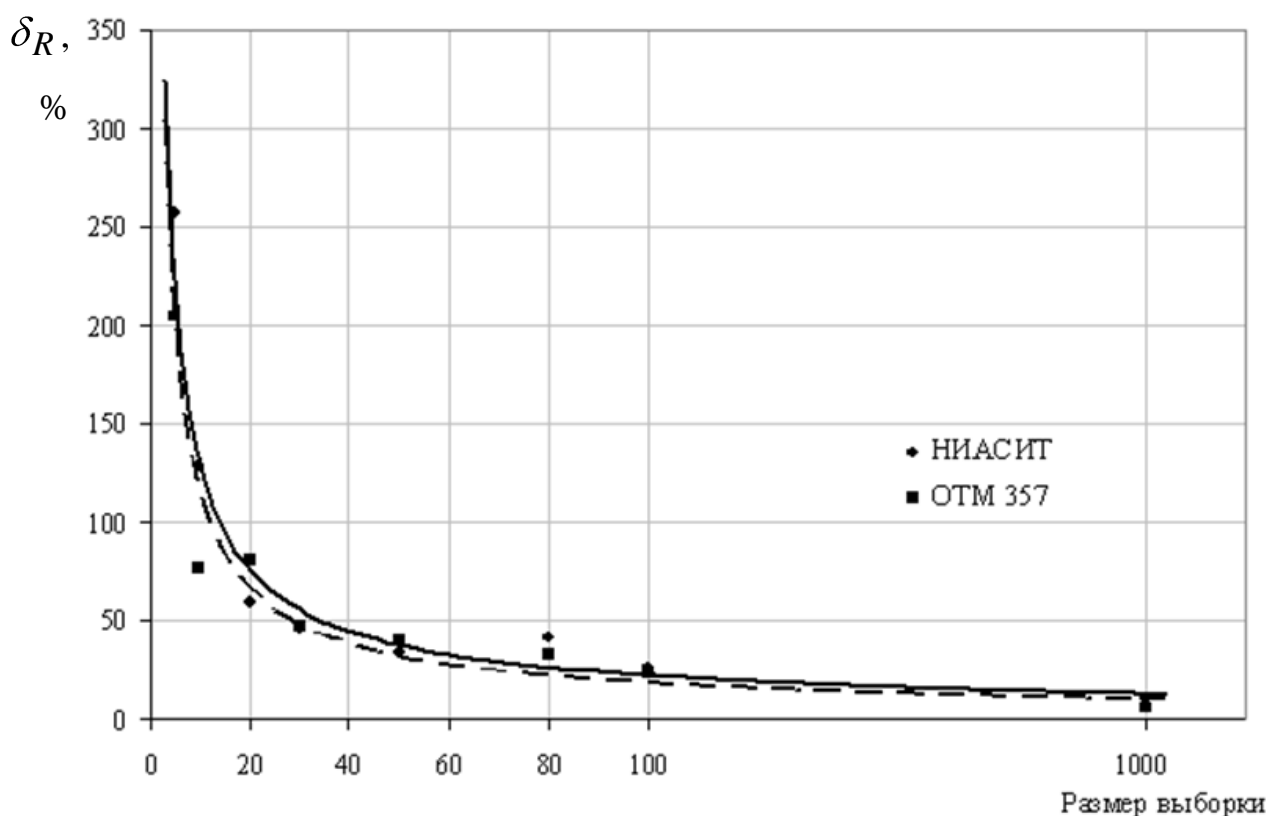


Рис. 2.8 Относительная погрешность оценок надежности изделий из материалов НИАСИТ и ОТМ-357 в зависимости от размера выборки

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что при использовании модели наислабейшего звена для прогноза поведения изделий из исследуемых материалов НИАСИТ и ОТМ-357 необходимо иметь репрезентативную выборку образцов для испытаний. Количество образцов, очевидно, определяется требуемой точностью анализа, техническими и финансовыми возможностями. Наиболее приемлемые по точности оценки, как видно из рис. 2.3-2.8, дают выборки, размером не менее 30.

2.2. Исследование масштабного фактора прочности керамических материалов

Важным моментом использования модели наислабейшего звена в инженерных расчетах является учет масштабного фактора прочности. Задаваясь вероятностью разрушения образца и изделия $P_f = 0,5$, из выражения (2.6) вытекает следующая масштабная зависимость

$$\frac{\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_0} = \left(\frac{k_0 V_0}{k V} \right)^{1/m}, \quad (2.24)$$

где $\bar{\sigma}_0$ и $\bar{\sigma}$ – средние значения пределов прочности; k_0 и k – коэффициенты нагрузки 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.

Зависимость отношения среднего напряжения разрушения образца $\bar{\sigma}_f$ к максимальному расчетному напряжению в изделии от эффективного объема образца V_{ef0} и изделия V_{ef} , согласно (2.23), будет равна

$$\frac{\bar{\sigma}_f}{\bar{\sigma}_{\max}} = \left(\frac{V_{ef}}{V_{ef0}} \right)^{1/m}. \quad (2.25)$$

Для различных модулей Вейбулла иллюстрация соотношения (2.25) представлена на рис. 2.9.

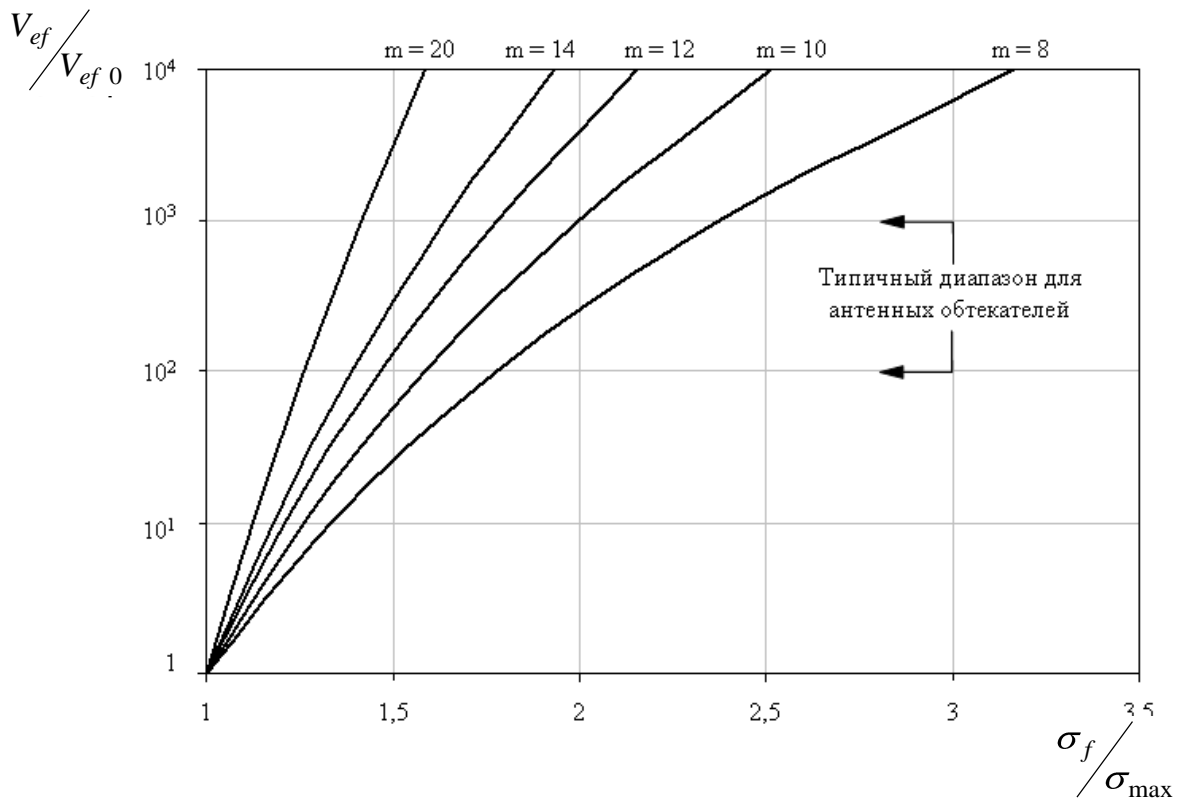


Рис. 2.9 Относительный эффективный объем в функции относительного напряжения разрушения

Для рассматриваемых элементов ЛА с относительными эффективными объемами $10^2 \dots 10^3$ и модулями Вейбулла 12 и 10 относительное напряжение разрушения будет составлять 1,5...2.

С помощью уравнения Вейбулла можно получить также взаимосвязь вероятностей разрушения образца P_0 и изделия P , вида

$$P = 1 - (1 - P_0)^{V_{ef} / V_{ef0}}. \quad (2.26)$$

Задаваясь вероятностью разрушения образца P_0 и соотношением эффективных размеров керамического изделия и образца, по уравнению (2.26) можно найти вероятность разрушения изделия P и по уравнению Вейбулла (2.6) соответствующее этой вероятности напряжение.

В масштабных уравнениях (2.24)-(2.26) вместо эффективных объемов V_{ef} могут быть использованы эффективные площади поверхностей S_{ef} . Предпочтение в выборе уравнения с эффективными объемами или площадями зависит от месторасположения наиболее опасных дефектов материала – в объеме или на поверхности.

Для экспериментальной проверки масштабного эффекта прочности кварцевой керамики НИАСИТ и стеклокерамики ОТМ-357³ были изготовлены образцы размерами 4×4×50 мм, 7×7×60 мм и 12×12×120 мм. Заготовки для образцов формовали из одного шликера и обжигали в соответствии с технологическими процессами производства соответствующих изделий, сохранив тем самым подобие в статистическом смысле образцов и изделий.

Статистические параметры полученных пределов прочности при трехточечном изгибе образцов материалов НИАСИТ и ОТМ-357 и оценки параметров Вейбулла, полученные МНК, приведены в табл. 2.4 и 2.5 соответственно.

Значения модуля Вейбулла исследуемой партии образцов материала НИАСИТ оказались несколько завышенными по сравнению со значениями, обычно получаемыми на образцах для аттестации по прочности изделий из данного материала. Возможно, это является результатом более тщательного их

³ Данный материал опубликован в [80].

изготовления и обработки. Близость оценок соответствующих параметров у ОТМ-357 для образцов разных размеров характеризует однородность структуры полученного материала, а также корректность проведенных испытаний.

Таблица 2.4 – Статистические параметры распределения пределов прочности и МНК-оценки параметров Вейбулла для материала НИАСИТ

Размер образца, мм	Число образцов	Среднее \pm станд. отклонение, МПа	Параметры Вейбулла	
			m	σ_c , МПа
4×4×50	58	73 \pm 4	17,3	74
7×7×60	52	70 \pm 4	18,5	73
12×12×120	42	62 \pm 7	11,9	67

Таблица 2.5 – Статистические параметры распределения пределов прочности и МНК-оценки параметров Вейбулла для материала ОТМ-357

Размер образца, мм	Число образцов	Среднее \pm станд. отклонение, МПа	Параметры Вейбулла	
			m	σ_c , МПа
4×4×50	69	125 \pm 15	8,9	132
7×7×60	86	110 \pm 15	7,9	117
12×12×120	56	97 \pm 13	8,2	103

На рис. 2.10 и 2.11 приведены экспериментальные значения пределов прочности НИАСИТ и ОТМ-357 совместно с построенными по ним масштабными зависимостями (пунктирные линии) и масштабные зависимости по уравнению (2.24) с оцененными по экспериментальным данным параметрами распределения Вейбулла (сплошные линии).

Различия в оценках предела прочности по уравнению (2.24) и полученной экспериментально составили не более 10%, что подтверждает свойственный материалам масштабный фактор прочности, описываемый моделью наислабейшего звена Вейбулла.

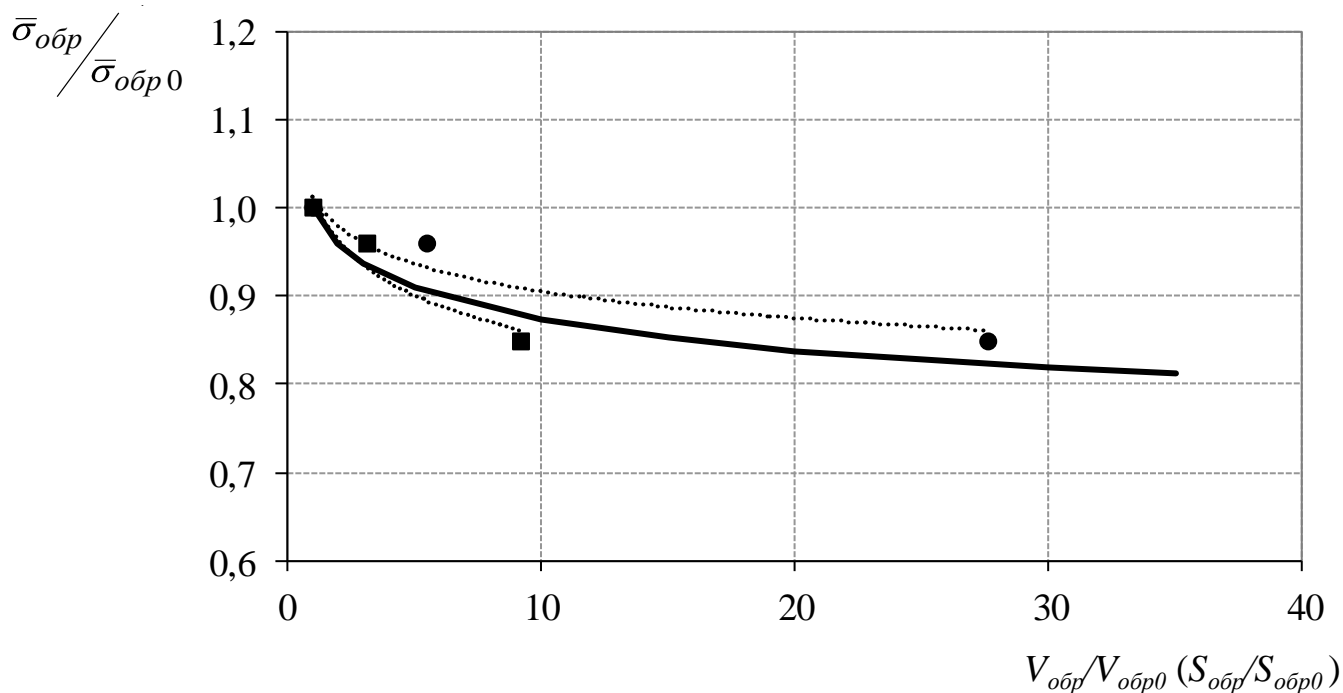


Рис. 2.10 Относительное снижение среднего предела прочности $\bar{\sigma}_{обр} / \bar{\sigma}_{обр0}$ материала НИАСИТ в зависимости от относительного увеличения объема $V_{обр} / V_{обр0}$ (●) и площади поверхности образцов $S_{обр} / S_{обр0}$ (■)

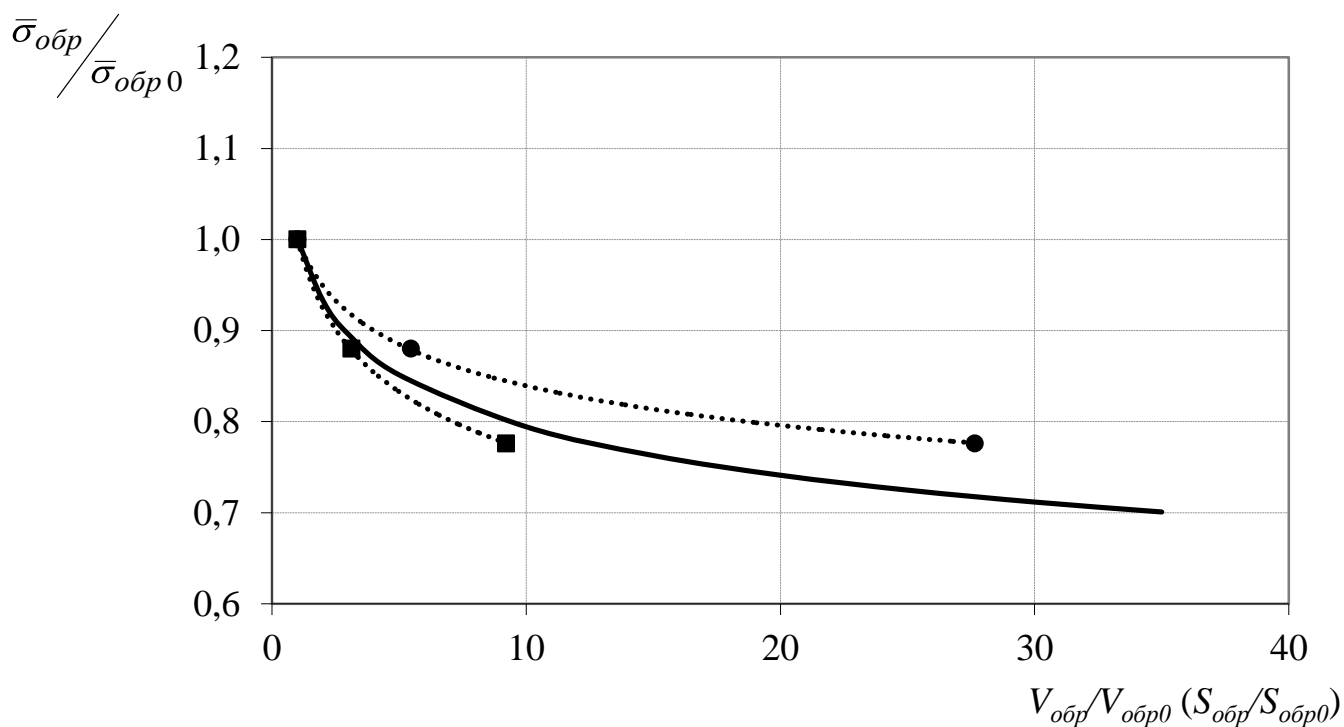


Рис. 2.11 Относительное снижение среднего предела прочности $\bar{\sigma}_{обр} / \bar{\sigma}_{обр0}$ материала ОТМ-357 в зависимости от относительного увеличения объема $V_{обр} / V_{обр0}$ (●) и площади поверхности образцов $S_{обр} / S_{обр0}$ ⁴

⁴ За базовые объем $V_{обр0}$ и площадь поверхности $S_{обр0}$ приняты объем и площадь поверхности образца размером 4×4×50 мм.

Однако относительно кварцевой керамики НИАСИТ следует отметить, что масштабный фактор прочности был установлен на образцах с открытой пористостью $(9,70 \pm 0,12)\%$. Для материала с большей пористостью $(11,60 \pm 1,17)\%$ зависимости предела прочности от размера образцов не наблюдается. Это в определенной степени соответствует результатам работы [81], в которой уменьшение предела прочности при уменьшении размеров образцов объясняют большим влиянием пористости материала. В малых образцах пористой керамики влияние пористости на прочностные показатели является более существенным, чем влияние таких факторов, как поверхностные трещины, неоднородность материала и другие дефекты. Данный вывод подтверждает также полученная на образцах $7 \times 7 \times 60$ мм зависимость средних значений пределов прочности $\bar{\sigma}_u$ и динамического модуля упругости $\bar{E}_{узк}$ ⁵ от открытой пористости (рис. 2.12).

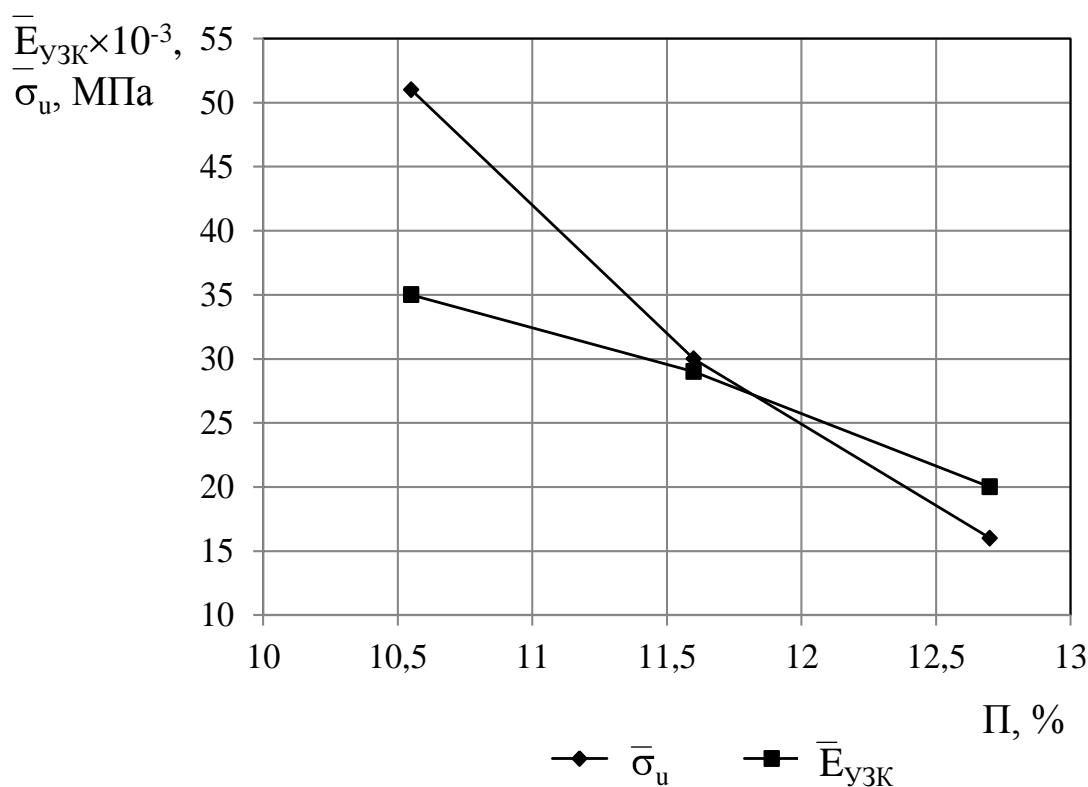


Рис. 2.12 Зависимость средних значений пределов прочности и динамического модуля упругости от пористости материала НИАСИТ

⁵ Динамический модуль упругости $E_{узк}$ определяли ультразвуковым импульсным методом. Для хрупких керамических материалов его значения близки к значениям статического модуля упругости [82].

2.3. Исследование взаимосвязи между пределами прочности керамических материалов при разных схемах испытаний

При испытании керамических материалов одноосное (линейное) растяжение трудно реализуется экспериментально. Основным источником погрешности является изгибающий момент в рабочем сечении образца из-за несоосности приложения нагрузки. Значительную проблему также представляют механическая обработка образцов сложной формы, концентрация напряжений, создаваемая на участке перехода от головок к рабочей части образца, крепление образца в испытательной машине.

Перечисленные методические проблемы приводят к значительному дополнительному разбросу результатов испытаний. В связи с этим испытания на прямое одноосное растяжение редко используются для аттестации конструкционной керамики, а для оценки предела прочности при растяжении все большее значение приобретают косвенные методы, такие как метод радиального (диаметрального) сжатия и трехточечного изгиба [13, 55, 76].

Метод радиального сжатия цилиндрических образцов является достаточно простым и, судя по литературным данным [55, 76], для многих материалов характеризуется более высокой воспроизводимостью результатов, чем осевое растяжение. В испытаниях на радиальное сжатие фиксируется величина максимальной силы, которая приложена контактно по образующей цилиндра и приводит к раскалыванию образца на две половины по линии действия сил от возникающих при радиальном сжатии поперечных растягивающих напряжений. Это позволяет оценить предел контактной прочности материала образца σ_k

$$\sigma_k = \frac{F}{d \cdot h}, \quad (2.27)$$

где F – разрушающая нагрузка, d и h – диаметр и длина образца соответственно.

Для перехода к пределу прочности при линейном растяжении используется зависимость

$$\hat{\sigma}_p = A\sigma_k, \quad (2.28)$$

где $\hat{\sigma}_p$ – оценка предела прочности при растяжении (предельное растягивающее напряжение, возникающее при радиальном сжатии), A – переходный коэффициент.

Значение коэффициента A можно определить, исходя из различных теорий прочности. Величина этого коэффициента зависит от механических свойств материала, характеризуемых коэффициентом хрупкости ν , равным отношению пределов прочности при осевых растяжении и сжатии

$$\nu = \sigma_p / \sigma_{сж}. \quad (2.29)$$

Таким образом, для того, чтобы оценить предел прочности при растяжении, нужно испытать материал не только на радиальное, но и на осевое сжатие.

Масштабная зависимость в модели наислабейшего звена Вейбулла позволяет оценить предел прочности при растяжении по результатам испытаний образцов керамики на трехточечный изгиб. Если в уравнение (2.24) подставить средние значения пределов прочности при растяжении и изгибе, то получим

$$\bar{\sigma}_p = \bar{\sigma}_u \left[\frac{1}{2(m+1)^2} \frac{V_u}{V_p} \right]^{\frac{1}{m}}, \quad (2.30)$$

где $\bar{\sigma}_u$ – среднее значение предела прочности при трехточечном изгибе, V_u и V_p – объемы образцов при испытаниях на изгиб и растяжение.

Для оценки пределов прочности при растяжении керамик НИАСИТ и ОТМ-357⁶ были изготовлены образцы из технологического припуска серийных изделий для испытаний на одноосное растяжение (для проверочных), радиальное сжатие и трехточечный изгиб:

- σ_k – цилиндрические образцы диаметром 30 мм и длиной 10 мм;
- $\sigma_{сж}$ – призматические образцы с квадратным сечением 10×10 мм и длиной 15 мм;
- σ_u – призматические образцы с квадратным сечением 7×7 мм и длиной 60 мм (расстояние между опорами составляет 50 мм);

⁶ Данный материал опубликован в [83-85].

– σ_p – плоские образцы толщиной 5 мм (для ОТМ 357 – 3 мм) и минимальной шириной рабочей части 5 мм.

Экспериментально полученные пределы прочности при разных схемах испытания σ_p , σ_u , σ_k , $\sigma_{сж}$ и оценки пределов прочности при растяжении косвенными методами приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6 – Средние значения и стандартные отклонения пределов прочности, полученных экспериментально при разных схемах испытаний, и оценки пределов прочности при растяжении

Прочность, МПа		НИАСИТ	ОТМ-357
Предел прочности при растяжении		41,1 ± 6,5	70,2 ± 13,5
Предел прочности при изгибе		57,5 ± 4,3	131,7 ± 15,8
Предел контактной прочности		34,5 ± 8,3	64,1 ± 17,1
Предел прочности при сжатии		169,1 ± 34,6	338,3 ± 84,7
Оценка пределов прочности при растяжении	Оценка через радиальное сжатие по теории Кулона-Мора $A = \frac{2}{\pi}(1 + 3\nu)$ [70]	36,0	64,0
	Оценка через радиальное сжатие по теории П. П. Баландина $A = \frac{2}{\pi}[\sqrt{1+11\nu+\nu^2} - (1-\nu)]$ [70]	69,1	113,1
	Оценка через радиальное сжатие по теории А. А. Лебедева $A = \frac{2}{\pi}\sqrt{1+12\nu^2}$ [70]	24,6	45,0
	Оценка через радиальное сжатие $A = \frac{2}{\pi}\sqrt{1+0,75\nu+9\nu^2}$ [49]	25,2	46,0
	Оценка через трехточечный изгиб по модели Вейбулла (уравнение (2.28))	37,4	75,0

Как следует из представленных данных, для обоих материалов результаты испытаний на растяжение характеризуются большим разбросом, чем при изгибе, но в то же время коэффициенты вариации для σ_p меньше, чем для $\sigma_{сж}$ и во всех случаях меньше, чем для σ_k .

Как видно из таблицы, наиболее близкие оценки пределов прочности при растяжении к полученной экспериментально для материалов НИАСИТ и ОТМ-357 дают метод радиального сжатия с использованием теории Кулона-Мора для определения переходного коэффициента A (разница 12,4 и 8,8% соответственно для НИАСИТ и ОТМ-357) и модель наислабейшего звена Вейбулла с использованием предела прочности при трехточечном изгибе (разница 9,9 и 6,4%).

Модель наислабейшего звена позволяет оценить предел прочности при растяжении не только образца, но и натурального изделия с учетом его эффективного объема, эквивалентного равномерному растяжению. Для этого в уравнении (2.29) V_p необходимо заменить на V_{ef} , что приводит к

$$\bar{\sigma}_{\text{обол}} = \bar{\sigma}_u \left[\frac{V_u}{V_{ef}} \times \frac{1}{2(m+1)^2} \right]^{\frac{1}{m}}. \quad (2.31)$$

Кроме этого, используя (2.10) и (2.31), можно оценить *минимально допустимый предел прочности при растяжении керамического изделия* (величину максимально возможного растягивающего напряжения, которое может выдержать материал изделия при заданной вероятности сохранения его несущей способности) σ_θ с учетом требуемой (нормативной) надежности R_a

$$\sigma_\theta = \frac{\bar{\sigma}_u}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)} \left[\frac{V_u}{V_{ef}} \times \frac{\ln \frac{1}{R_a}}{2(m+1)^2} \right]^{\frac{1}{m}}. \quad (2.32)$$

Для некоторых типов изделий ЛА, основные характеристики, габариты и требуемая надежность (по техническому заданию (ТЗ) или техническим условиям (ТУ)) которых представлены в табл. 2.7, с модельными параметрами Вейбулла (см. п. 2.1.1, стр. 45) значения среднего и минимально допустимого с учетом требуемой надежности пределов прочности керамического материала в изделии приведены в табл. 2.8.

Таблица 2.7 – Основные характеристики и габариты исследуемых изделий с оболочками из материалов НИАСИТ и ОТМ-357

Материал	Изделие	Длина, м	Ради- ус, м	V $\times 10^{-3}$, $м^3$	R_a (по ТЗ, ТУ)
НИАСИТ	ОТИ 395	1,150	0,190	4,370	не установлено (изделие должно быть работоспособно и не разрушаться при воздействии аэродин. нагрева и силовых нагрузок, соот-щих всем возможным условиям эксплуатации и боевого применения)
	ОТИ 436	0,700	0,240	3,740	$\geq 0,99900$ – после пребывания в условиях, оговоренных в ТЗ, при доверительной вероятности 0,9
ОТМ-357	ОТИ 742	0,550	0,100	0,550	не установлено (надежность подтверждается по результатам испытаний)
	ОТИ 1129	0,877	0,170	2,100	$\geq 0,99990$ – за время хранения, транспортирования и натурной работы, 0,99 – начальный уровень на этапе отработки

Таблица 2.8 – Оценки прочностных показателей и прочностной надежности некоторых типов изделий

Материал	Изделие	σ_{\max} , МПа	$V_{ef} \times 10^{-3}$, м ³	$\bar{\sigma}_{\text{обол}}$, МПа	σ_{θ} , МПа	R (модель (2.10))
НИАСИТ	ОТИ 395	11,0	0,44	28,7	16,9	0,99986082
	ОТИ 436	7,0	0,37	29,1	17,1	0,99998939
ОТМ-357	ОТИ 742	19,0	0,13	46,2	24,3	0,99999004
	ОТИ 1129	14,0	0,21	44,0	18,4	0,99999996

Значения максимальных растягивающих напряжений, возникающих при воздействии тепловых и аэродинамических нагрузок, заданных в ТЗ, и эффективного объема (табл. 2.8) определены с помощью программного комплекса ANSYS по методу конечных элементов, без учета случайности нагружения (см. п. 4.2).

В табл. 2.8 представлены также оценки прочностной надежности изделий по модели Вейбулла. Как видно из таблицы, даже при предварительном анализе с модельными параметрами Вейбулла надежность исследуемых изделий находится на высоком уровне и соответствует требованиям ТЗ (ТУ).

В табл. 2.9 приведены оценки коэффициента запаса прочности, равного отношению минимально допустимого предела прочности изделия к максимальным расчетным напряжениям, и коэффициента запаса прочности, полученного при испытании изделий на теплопрочностном стенде и равного отношению разрушающей нагрузки (или нагрузки в конце режима испытания, если изделие до разрушения не доводилось) к эксплуатационной с учетом коэффициента безопасности. Прогнозируемый коэффициент запаса прочности достаточно хорошо согласуется с полученным на практике.

Однако следует отметить, что поскольку для нахождения оценок прочностных показателей изделий были использованы модельные параметры Вей-

булла, оценки требуют корректировки с учетом реальных параметров, получаемых при испытании партий образцов каждого изделия отдельно.

Таблица 2.9 – Значения коэффициентов запаса прочности

Материал	Изделие	Прогнозируемый	По результатам испытаний
НИАСИТ	ОТИ 395	1,53	2,00...4,13
	ОТИ 436	2,44	2,00...3,50
ОТМ-357	ОТИ 742	1,28	1,46...2,80
	ОТИ 1129	1,32	1,09...1,67

2.4. Разработка методики оценки допустимого предела прочности керамических материалов в изделиях с заданными уровнями нагружения и надежности

При аттестации керамических изделий по прочности используются испытания на трехточечный изгиб стандартных образцов (7×7×60 мм), вырезанных из технологического припуска оболочки, или образцов-спутников. Решение о годности изделия принимается на основе сравнения среднего значения предела прочности при изгибе, рассчитанного по испытаниям 10 и более образцов, с заданной величиной допустимого предела прочности $[\sigma]$ материала. В случае если $\bar{\sigma}_u < [\sigma]$, изделие будет забраковано.

Очевидна важность правильного установления допустимого предела прочности при изгибе $[\sigma]$, поскольку в противном случае, например, при необоснованно завышенном его значении, могут быть забракованы годные изделия, что приведет к неоправданным трудовым и финансовым затратам. Однако до сих пор в практике конструкторского отдела НПК «РПО» ОАО «ОНПП «Технология» не существует обоснованной методики назначения необходимого уровня $[\sigma]$. В настоящее время он устанавливается исходя из достаточно субъективных соображений и без учета особенностей конкретного изделия и условий его нагружения.

Исходя из модели Вейбулла (2.10), вероятность безотказной работы (прочностная надежность) изделия, находящегося в напряженном состоянии при действии σ_{\max} , равна

$$R = 1 - P(\sigma_{\max}) = \exp\left\{-\frac{V_{ef}}{V_0}\left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_c}\right)^m\right\}. \quad (2.33)$$

Уравнение (2.33) с учетом масштабной зависимости (2.25) позволяет получить выражение для оценки предела прочности керамического материала, ниже которого средний предел прочности при испытаниях на изгиб образцов, аттестуемых оболочку, недопустим (уровень прочности, который требуется для безотказной работы изделия определенного объема и надежности)

$$[\sigma] = \sigma_{\max} \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \left(\frac{V_u}{V_{ef}} \times \frac{\ln \frac{1}{R_a}}{2(m+1)^2}\right)^{-1/m}. \quad (2.34)$$

Введение в уравнение (2.34) гамма-функции необходимо для масштабирования значения $[\sigma]$, что позволяет более корректно использовать ее в качестве меры при сравнении с ней средних значений пределов прочности, полученных при испытаниях ограниченной выборки образцов.

Получение средних значений пределов прочности ниже уровня, оцененного по уравнению (2.34), может не гарантировать выполнения заданных требований по несущей способности и надежности.

Разработанной методикой рекомендуется пользоваться на этапе разработки керамического изделия после проведения детерминированных расчетов его напряженно-деформированного состояния (НДС), позволяющих оценить возникающие в материале под воздействием приложенной тепловой и силовой нагрузки максимальные растягивающие напряжения и напряженный объем изделия.

Очевидно, что поскольку минимально допустимый предел прочности керамического материала, полученный в результате испытаний образцов при

трехточечном изгибе, является функцией напряженного объема изделия при заданном нагружении, его величина будет разной для различных изделий, изготовленных из одного и того же материала. Это существенное замечание, т.к. до сих пор при разработке керамических изделий допустимый уровень предела прочности, как правило, назначается одинаковым для всех изделий.

Для наглядности на рис. 2.13 представлена зависимость допустимых напряжений керамического материала с модулем Вейбулла $m = 11$ от максимальных расчетных напряжений для трех уровней надежности при соотношении объемов образца и изделия $V_u/V_{ef} = 10^{-3}$; на рис. 2.14 – влияние отношения V_u/V_{ef} на зависимость $[\sigma]$ от σ_{\max} при заданном уровне $R_a = 0,99$. Данные графики можно использовать для получения экспресс-оценки величины $[\sigma]$.

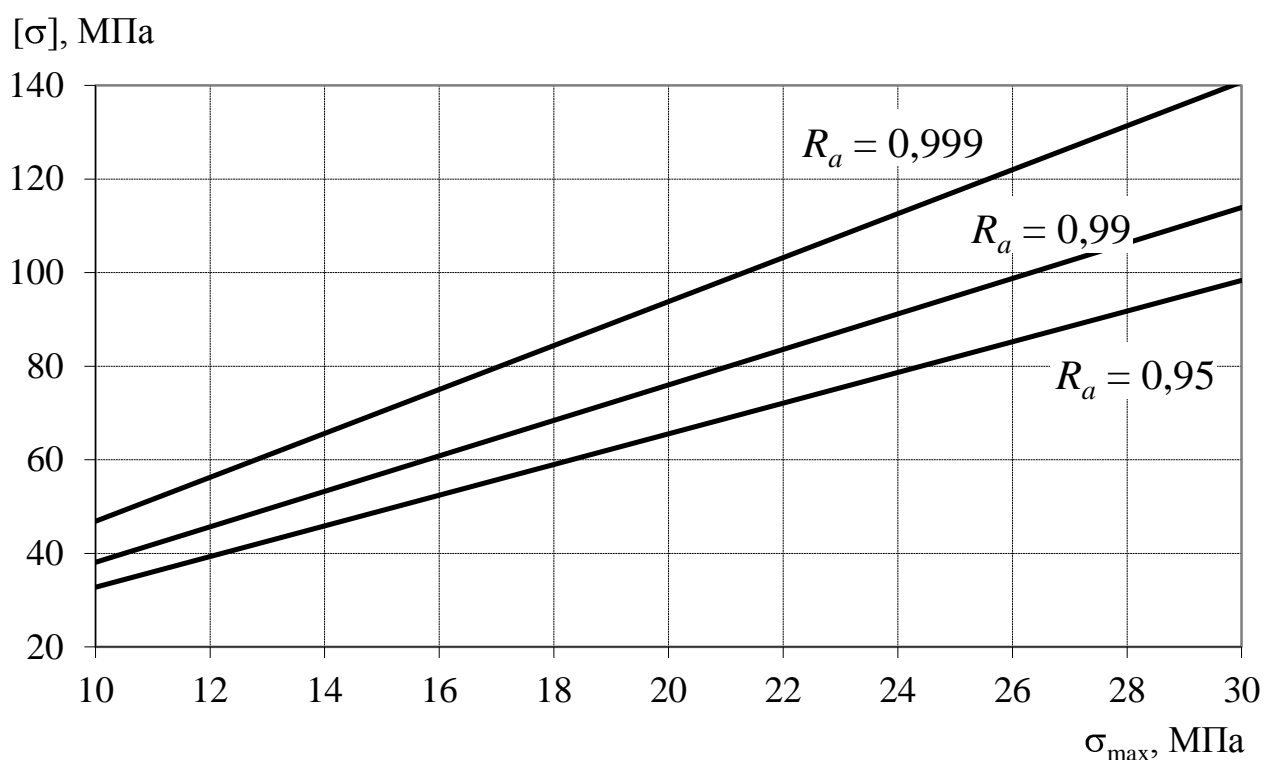


Рис. 2.13 Зависимость допустимых напряжений при изгибе от максимальных расчетных напряжений в керамическом изделии с $V_u/V_{ef} = 10^{-3}$ для различных уровней надежности

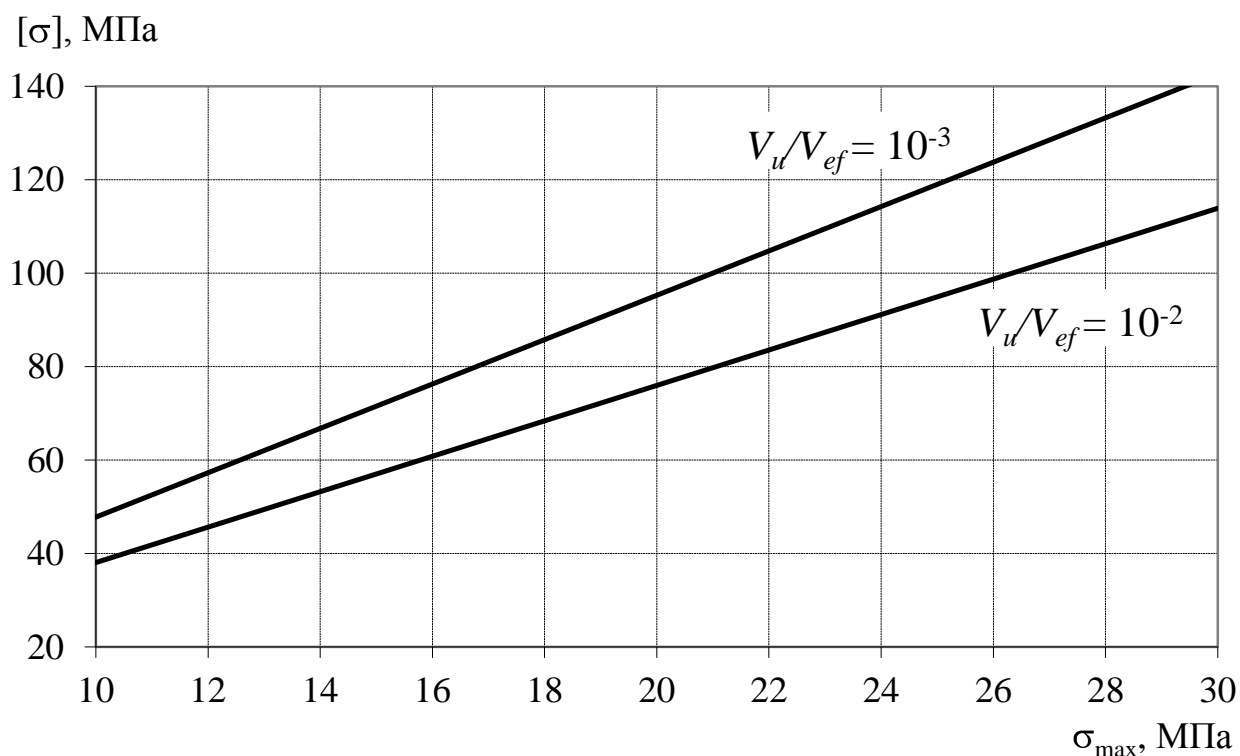


Рис. 2.14 Зависимость допустимых напряжений при изгибе от максимальных расчетных напряжений в керамическом изделии при $R_a = 0,99$ для различных соотношений объемов изделия и образца

Оценки минимально допустимого предела прочности при изгибе керамического материала для рассматриваемых типов изделий из НИАСИТ и ОТМ-357 представлены в табл. 2.10⁷. Значения модуля Вейбулла m были взяты 12 и 10 соответственно для кварцевой керамики и стеклокерамики.

В настоящее время для всех типов изделий, изготовленных из стеклокерамики ОТМ-357, используется значение $[\sigma] = 108$ МПа. Как видно из табл. 2.10, для изделия ОТИ 742 данный уровень соответствует надежности не ниже 0,999, но поскольку для этого изделия не установлено требований к надежности, то, задаваясь $R_a = 0,999$, можно ограничиться $[\sigma] = 93$ МПа. Для изделия ОТИ 1129 установленный уровень $[\sigma]$ может быть незначительно снижен до 91 МПа с сохранением требуемой надежности.

⁷ Данный материал опубликован в [86].

Таблица 2.10 – Результаты оценки минимально допустимого предела прочности при изгибе керамического материала разных типов изделий

Материал	Изделие	σ_{\max} , МПа	$V_u/V_{ef} \times 10^{-3}$	Оценка $[\sigma]$ для разных уровней R_a			
				0,900	0,990	0,999	0,9999
НИАСИТ	ОТИ 395	11,0	5,6	31,8	38,7	46,9	56,8
	ОТИ 436	7,0	6,6	20,0	24,3	29,5	35,7
ОТМ-357	ОТИ 742	19,0	18,8	58,3	73,7	92,9	116,9
	ОТИ 1129	14,0	11,7	45,1	57,0	71,8	90,4

Анализ базы данных испытаний на трехточечный изгиб образцах, изготовленных из технологических припусков оболочек изделий ОТИ 742 и ОТИ 1129, изготовленных в период с 2010г. по I полугодие 2014г., представлен в табл. 2.11. С величиной $[\sigma]$ сравнивались значения среднего предела прочности при изгибе $\bar{\sigma}_u$ и нижний 95%-й доверительный интервал для среднего предела прочности $\sigma_{u\ 95\%}$, как принято сейчас в используемой на предприятии методике испытания. Как видно из представленных данных, снижение уровня $[\sigma]$ с 108 до 93 МПа для ОТИ 742 привело бы к снижению количества забракованных изделий с 11,8 до 0,9%; снижение $[\sigma]$ с 108 до 91 МПа для ОТИ 1129 – с 3,2 до 0,0%.

Таблица 2.11 – Процент и количество изделий из ОТМ-357 со средним пределом прочности ниже допустимого

Изделие	Кол-во изделий	$\bar{\sigma}_u < 108$ МПа		$\sigma_{u\ 95\%} < 108$ МПа		$\bar{\sigma}_u < 93$ МПа		$\sigma_{u\ 95\%} < 93$ МПа	
		%	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.
ОТИ 742	670	2,2	15	11,8	79	0,0	0	0,9	6
		$\bar{\sigma}_u < 108$ МПа		$\sigma_{u\ 95\%} < 108$ МПа		$\bar{\sigma}_u < 91$ МПа		$\sigma_{u\ 95\%} < 91$ МПа	
ОТИ 1129	63	0,0	0	3,2	2	0,0	0	0,0	0

Согласно ТУ на изделия, изготовленные из материала НИАСИТ, значение допустимых напряжений $[\sigma]$ для изделия ОТИ 395 составляет 39,2 МПа, для изделия ОТИ 436 – 34,0 МПа. Как видно из табл. 2.10, принятые для данных изделий в настоящее время уровни допустимых напряжений, обеспечивают для изделия ОТИ 395 надежность не ниже 99,0% и для изделия ОТИ 436 – не ниже 99,9%. Очевидно, что для ОТИ 395 уровень $[\sigma] = 39,2$ МПа снижать нельзя, а для ОТИ 436 он может быть незначительно снижен до 30,0 МПа, что приведет к увеличению количества годных изделий на 40% при сохранении заданного уровня их надежности (табл. 2.12).

Таблица 2.12 – Процент и количество изделий из материала НИАСИТ со средним пределом прочности ниже допустимого

Изделие	Кол-во изделий	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.
ОТИ 395	1260	$\bar{\sigma}_u < 39,2$ МПа		$\sigma_{u\ 95\%} < 39,2$ МПа		–		–	
		0,0	0	0,0	0	–	–	–	–
ОТИ 436	241	$\bar{\sigma}_u < 34,0$ МПа		$\sigma_{u\ 95\%} < 34,0$ МПа		$\bar{\sigma}_u < 30,0$ МПа		$\sigma_{u\ 95\%} < 30,0$ МПа	
		3,3	8	4,1	10	2,5	6	2,5	6

На основе проведенного исследования разработана методика оценки допустимого напряжения разрушения (ПМ 596.1660-2007 «Оценка допустимого предела прочности керамического материала для изделия с заданными уровнями нагружения и надежности»), которая активно используется при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в НПК «РПО» ОАО «ОНПП «Технология».

2.5. Исследования в системе «структура – предел прочности» керамических материалов

Несмотря на отработанную технологию и тщательную обработку материала в любой керамической конструкции существует случайное распределение

дефектов различных размеров и местоположений. Дефекты, служащие причиной разрушения образца или изделия, можно условно разделить на дефекты, образующиеся в технологических процессах создания заготовок материала, и дефекты, которые могут возникать или развиваться в процессе эксплуатации изделия. Дефекты подразделяются на внутренние, образующиеся за счет некачественного размолла порошка, неравномерной усадки, неполного спекания, и поверхностные, образующиеся в результате механической обработки или внешних механических воздействий.

Дефектами микро- и макроструктур считают границы соответствующих элементов структуры – границы зерен, кристаллов, фаз, а также пустоты в виде трещин и пор, т.е. дефекты можно относить к элементам структуры материала [14]. Согласно [14, 15] иерархический список дефектов структуры керамики, построенный по принципу уменьшения степени их влияния на прочность, выглядит следующим образом: макротрещины и макропоры, микротрещины и микропоры, межфазные границы, границы поликристаллических зерен, границы кристаллов и т.д. вплоть до структур третьего порядка. Такая иерархия структуры и дефектов заставляет при анализе прочности обращать внимание в первую очередь на дефекты макроструктуры, которые к тому же легче поддаются контролю. При этом повышенное влияние на прочность оказывают дефекты поверхности керамики, обусловленные технологией изготовления, и объединенные дефекты: трещина + поверхностный дефект, трещина + неоднородность структуры (пора или включение). Хотя, следует отметить, что разделение дефектов на объемные и поверхностные является достаточно условным, поскольку такие дефекты, как поры и включения, могут быть как в объеме, так и на поверхности.

На рис. 2.15 в качестве примера показаны фрактографические изображения типичных технологических дефектов, инициирующих разрушение образцов стеклокерамики ОТМ-357, и соответствующие им напряжения разрушения, анализ и систематика дефектов приведены в работах [87, 88].

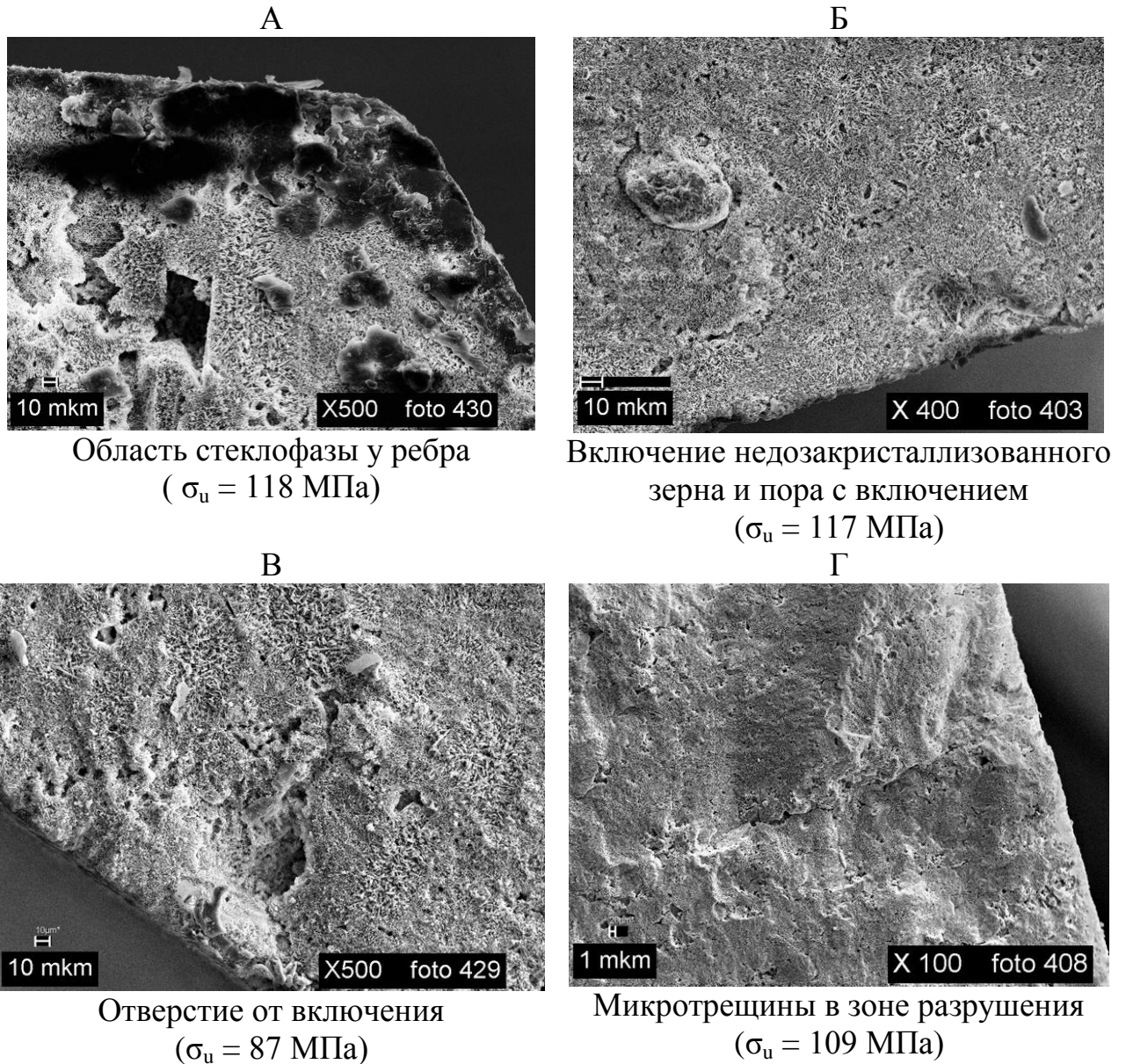


Рис. 2.15 Типичные дефекты, инициирующие разрушение образцов стеклокерамики ОТМ-357

Методы механики разрушения и статистики прочности позволяют математически связать показатели прочности керамики с размером, формой, ориентацией и ростом критических дефектов в материале.

Механика разрушения берет свое начало от работ Гриффитса, Дж. Тейлора, Орована, Ирвина [89]. Из энергетического критерия Гриффитса, заключающегося в том, что существующая трещина станет лавинообразно распространяться, если только скорость освобождения энергии упругой деформации презойдет прирост поверхностной энергии трещины, вытекает уравнение Гриффитса-Орована для оценки критического действующего напряжения

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi c_g}} \quad (2.35)$$

для плоского напряженного состояния и

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi(1-\mu^2)c_g}} \quad (2.36)$$

для плоского деформированного состояния.

В (2.35)-(2.36) обозначены: E – модуль упругости, γ – эффективная поверхностная энергия, включающая в себя истинную поверхностную энергию и энергию пластической деформации вблизи вершины трещины, c_g – критическая длина трещины.

Уравнения (2.35)-(2.36) были выведены для бесконечной пластины единичной толщины с центральной поперечной трещиной длиной $2c_g$.

Ирвин предложил записать критерий Гриффитса в общем виде, более удобном для практического использования

$$K_{IC} = \sigma_g \sqrt{\pi c_g}, \quad (2.37)$$

где K_{IC} – критический коэффициент интенсивности напряжений (вязкость разрушения) в вершине трещины.

K_{IC} является мерой трещиностойкости и характеризует возможность материала сопротивляться распространению трещин. Для материалов с малой вязкостью разрушения допускаются только маленькие трещины. В идеальном случае при истинно хрупком разрушении коэффициент K_{IC} является постоянной материала, зависящей только от температуры.

Величина K_{IC} может быть рассчитана при испытаниях на трехточечный изгиб образца с предварительно нанесенным надрезом по формуле [90]

$$K_{IC} = \frac{3Fl}{2bh^2} f(a/h) \sqrt{a}, \quad (2.38)$$

где F – критическая нагрузка; l – расстояние между опорами; b и h – ширина и длина образца; a – глубина надреза; $f(a/h)$ – К-тарировочная функция, зависящая от отношения глубины надреза и длины образца.

В табл. 2.13 приведены результаты испытаний образцов из материалов НИАСИТ и ОТМ-357 на трехточечный изгиб и трещиностойкость.

Таблица 2.13 – Средние значения и стандартные отклонения плотности, пористости, предела прочности, критического коэффициента интенсивности напряжений и параметры Вейбулла исследуемых выборок образцов

Вид испытания	Характеристики	НИАСИТ		ОТМ-357
		$P = 7-9\%$	$P = 10-11\%$	
Испытания на трехточечный изгиб	Объем выборки	97	–	48
	Плотность, кг/м ³	2019 ± 12	–	2492 ± 6
	Пористость P , %	8,30 ± 0,55	–	0,127 ± 0,041
	Предел прочности при изгибе, МПа	72,8 ± 7,5	–	127,5 ± 14,3
	Модуль Вейбулла	11,3	–	9,8
	Параметр масштаба	76,0	–	133,8
Испытания на трещиностойкость	Объем выборки	43	58	53
	Плотность, кг/м ³	2019 ± 13	1966 ± 6	2493 ± 4
	Пористость P , %	8,21 ± 0,51	10,63 ± 0,21	0,188 ± 0,059
	K_{IC} , МПа м ^{-1/2}	0,91 ± 0,06	0,84 ± 0,05	1,34 ± 0,07

Образцы для испытаний на трехточечный изгиб и трещиностойкость из материала ОТМ-357 были изготовлены из одной партии шликера и обожжены в одинаковых условиях, что дает возможность предполагать идентичность их микроструктуры в каждом виде этих испытаний.

Образцы из материала НИАСИТ были также изготовлены из одной партии шликера, но обожжены при двух разных режимах: 1) температура 1260°C и выдержка 3 ч (полученная пористость $P = 7-9\%$); 2) температура 1240°C и выдержка 2 ч ($P = 10-11\%$). Таким образом, были получены образцы материала с одинаковой структурой после формовки, но различающиеся между собой после обжига степенью спекания и, соответственно, пористостью.

Из представленных в табл. 2.13 результатов следует, что увеличение пористости материала НИАСИТ на $\approx 30\%$ (с 8,21 до 10,63) приводит к относительно

небольшому (на 8,3%) уменьшению величины K_{IC} (с 0,91 до 0,84 МПа м^{-1/2}). В то же время предел прочности при статическом изгибе при этом уменьшается более существенно – на 15% (с 72,8 до 62,0⁸ МПа). Т.е. величина содержания пор по-разному влияет на прочность и трещиностойкость материала.

Зная величину K_{IC} , можно рассчитать предел прочности при растяжении материала с трещинами любых размеров, а также какой размер трещины допустим в материале, напряженном до заданного уровня. Критический размер дефекта в структуре материала, контролирующей минимально допустимые напряжения материала керамической оболочки (2.30), равен

$$c_g = \left(\frac{K_{IC}}{Y/Z \sigma_\theta} \right)^2 = \left(\frac{K_{IC}}{Y/Z \bar{\sigma}_u} \right)^2 \times \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{m} \right) \times \left[\frac{V_u}{V_{ef}} \times \frac{\ln \frac{1}{R_a}}{2(m+1)^2} \right]^{\frac{2}{m}}, \quad (2.39)$$

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). Чем больше отношение вязкости разрушения к пределу прочности при растяжении, тем допускаются более длинные трещины.

Предел прочности любого элемента объема будет, согласно уравнению Гриффитса, однозначно определен наибольшим из повреждений, имеющих в этом элементе, поскольку его размеру отвечает наименьшая величина напряжения. Следовательно, распределение наибольших повреждений по элементам объема связано с распределением локального предела прочности по этим элементам [11].

⁸ По результатам испытаний образцов с $\Pi = 10,6\%$, изготовленных из технологического припуска серийных изделий.

2.5.1. Модель разрушения Вейбулла с распределением Коши наибольших критических дефектов

Вероятность того, что дефекты в небольшом объеме V_0 (того же порядка, что и размер дефекта) крупнее c_g , составляет [13]

$$P(c \geq c_g) = V_0 \int_{c_g}^{\infty} g(c) dc, \quad (2.40)$$

а вероятность того, что дефекты в большем объеме V крупнее, чем c_g , для однородного растяжения равна

$$P(c \geq c_g) = 1 - \exp \left[-V \int_{c_g}^{\infty} g(c) dc \right], \quad (2.41)$$

где $g(c)$ – плотность распределения дефектов.

Если для предельных величин c имеет место распределение Коши (третье асимптотическое распределение экстремальных значений) в виде

$$\lim_{c \rightarrow \infty} g(c) = g_0 (c_0/c)^z \quad (2.42)$$

с параметрами распределения g_0 , c_0 и z , то после подстановки $g(c)$ и интегрирования уравнение (2.41) преобразуется к виду

$$P(c \geq c_g) = 1 - \exp \left[-V \frac{g_0 c_0}{z-1} \left(\frac{c_0}{c_g} \right)^{z-1} \right]. \quad (2.43)$$

От распределения размеров дефектов можно теперь перейти к вероятности разрушения при напряжении меньше σ_g , используя соотношение механики разрушения (2.37), что дает

$$P(\sigma \leq \sigma_g) = 1 - \exp \left\{ -V \frac{g_0 c_0}{z-1} \left(\frac{\sigma_g \sqrt{\pi c_0}}{K_{IC}} \right)^{2(z-1)} \right\}. \quad (2.44)$$

Сравнивая уравнение (2.44) с уравнением (2.6), можно заключить, что распределение Вейбулла представляет собой достаточно хорошо обоснованное соотношение для вероятности разрушения подвергнутого однородному растяги-

вающему напряжению тела, содержащего очень большое число хаотично расположенных в пространстве дефектов с распределением Коши для предельной области размеров дефектов. Причем модуль Вейбулла $m = 2 \cdot (z-1)$, т.е. он является свойством материала, напрямую зависящим от распределения размеров дефектов.

Если имеется информация о разделении дефектов на поверхностные глубиной Δd и объемные, то уравнение (2.44) приобретет вид

$$P(\sigma \leq \sigma_g) = 1 - \exp \left\{ - \frac{g_0 c_0}{z-1} \left[\frac{1}{2^{z-1}} V - \left(1 - \frac{1}{2^{z-1}} \right) A \Delta d \right] \left(\frac{\sigma_g \sqrt{\pi c_0}}{K_{IC}} \right)^{2(z-1)} \right\}, \quad (2.45)$$

где A – площадь поверхности изделия.

Для оценки зависимости плотности дефектов δ (число дефектов в единице объема) в материале от их размеров c были использованы результаты испытаний образцов материалов НИАСИТ и ОТМ-357 на одноосное растяжение и трещиностойкость и соотношение (2.35)⁹. После построения вариационного ряда пределов прочности расчет плотности дефектов был произведен по формуле

$$\delta = \begin{cases} M_i / (N V_p) & , i = 1 \\ M_i / \left[\left(N - \sum_{j=1}^{i-1} M_j \right) V_p \right] & , i = 2, \dots, N \end{cases} \quad (2.46)$$

где M_i – число разрушившихся образцов при i -м разрушающем напряжении; N – число испытанных образцов.

В результате такой обработки данных были получены зависимости между размерами дефектов¹⁰ и их плотностью δ в материалах НИАСИТ и ОТМ-357, представленные на рис. 2.16 точками. Функции плотности распределения размеров дефектов $g(c)$ найдены аппроксимацией полученных эмпирических функций уравнением (2.42) с параметрами g_0, c_0, z , оцененными по МНК. Значения $g(c)$ и кумулятивной функции распределения

⁹ Данный материал опубликован в [91, 92].

$$G(c) = 1 - \frac{g_0 c_0}{z-1} \left(\frac{c_0}{c} \right)^{z-1} \quad (2.47)$$

для НИАСИТ и ОТМ-357 приведены в табл. 2.14.

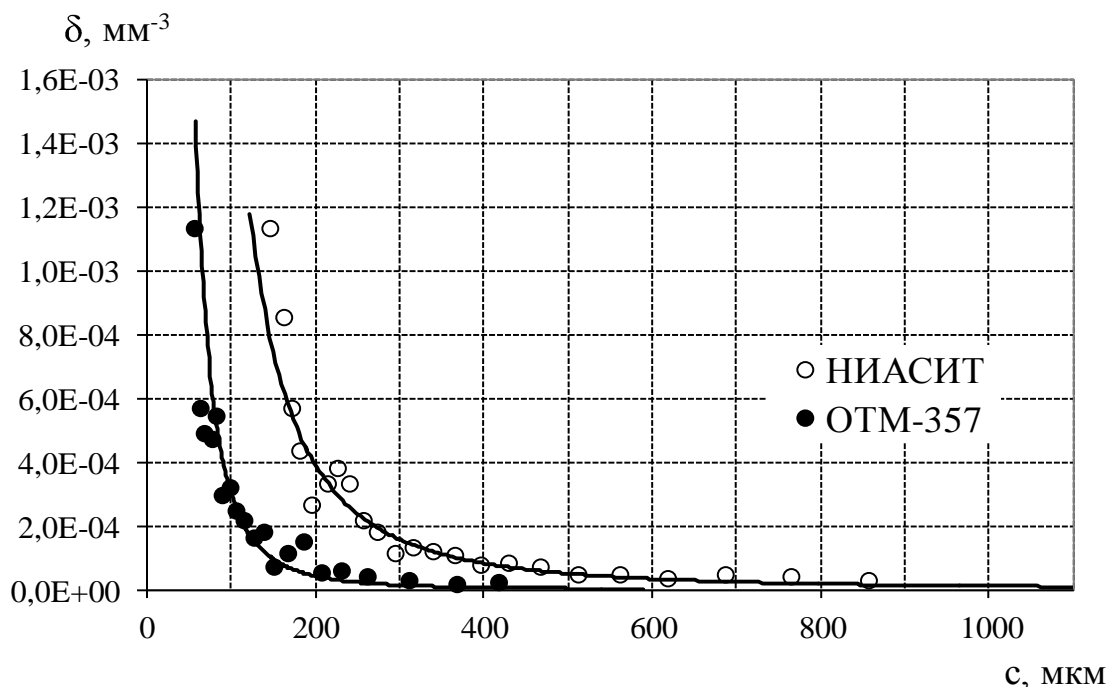


Рис. 2.16 Зависимость плотности дефектов в материалах НИАСИТ и ОТМ-357 от размера дефекта

Таблица 2.14 – Параметры распределения дефектов

Материал	g_0	c_0	z	Функция распределения	Плотность распределения
НИАСИТ	$0,9 \cdot 10^{-7}$	1	2,25	$G(c) = 1 - 47,2c^{-1,25}$	$g(c) = 59c^{-2,25}$
ОТМ-357	$4,2 \cdot 10^{-7}$	1	2,85	$G(c) = 1 - 82,2c^{-1,85}$	$g(c) = 152c^{-2,85}$

Согласно полученным результатам можно предположить, что на 1 мм^3 объема материала приходится не меньше одного дефекта размером $\approx 150 \text{ мкм}$ для материала НИАСИТ и размером 50 мкм для ОТМ-357. Хотя НИАСИТ и имеет гораздо больший размах размеров неоднородностей, чем ОТМ-357, это

¹⁰ Под размером дефекта c понимается глубина поверхностного дефекта или полудлина большой оси объемного эллиптического дефекта.

вовсе не говорит о том, что он более дефектен, поскольку, являясь более пористым материалом, чем ОТМ-357, он имеет другую микроструктуру.

По полученным данным были вычислены и построены статистические распределения размеров дефектов (рис. 2.17).

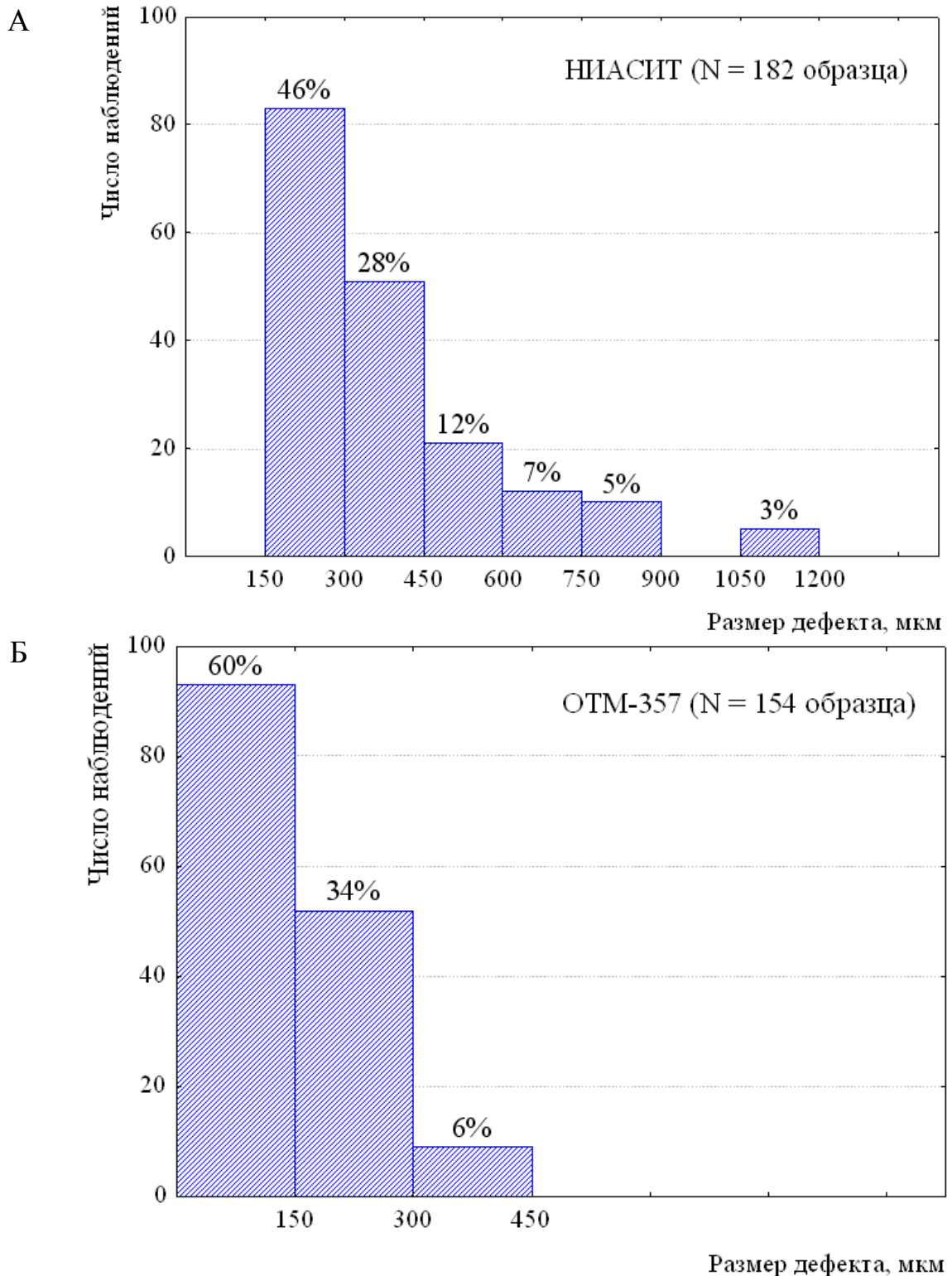


Рис. 2.17 Относительная частота распределения дефектов по их размерам материалов НИАСИТ (А) и ОТМ-357 (Б)

Представленные результаты позволяют говорить о том, что в материале НИАСИТ практически половину всех неоднородностей составляют неоднородности размером до 300 мкм, одну третью часть – от 300 до 450 мкм и одну четвертую часть – размером свыше 450 мкм. В единичном объеме материала ОТМ-357 почти 2/3 всех неоднородностей составляют дефекты размером не выше 150 мкм и 1/3 – от 150 до 300 мкм и выше. Неоднородности размером больше 300 мкм встречаются достаточно редко (в шести образцах из 100).

Очевидно, что наибольший интерес представляет вопрос о критических размерах неоднородностей, находящихся в материале и контролирующих его прочность. Однако всегда следует иметь в виду, что даже некритические по размерам дефекты могут вырасти до критических размеров под нагрузкой.

Взаимосвязь значений предела прочности при растяжении и размеров дефектов, вытекающая из уравнения (2.37), а также результаты фрактографических исследований образцов стеклокерамики приведены на рис. 2.18.

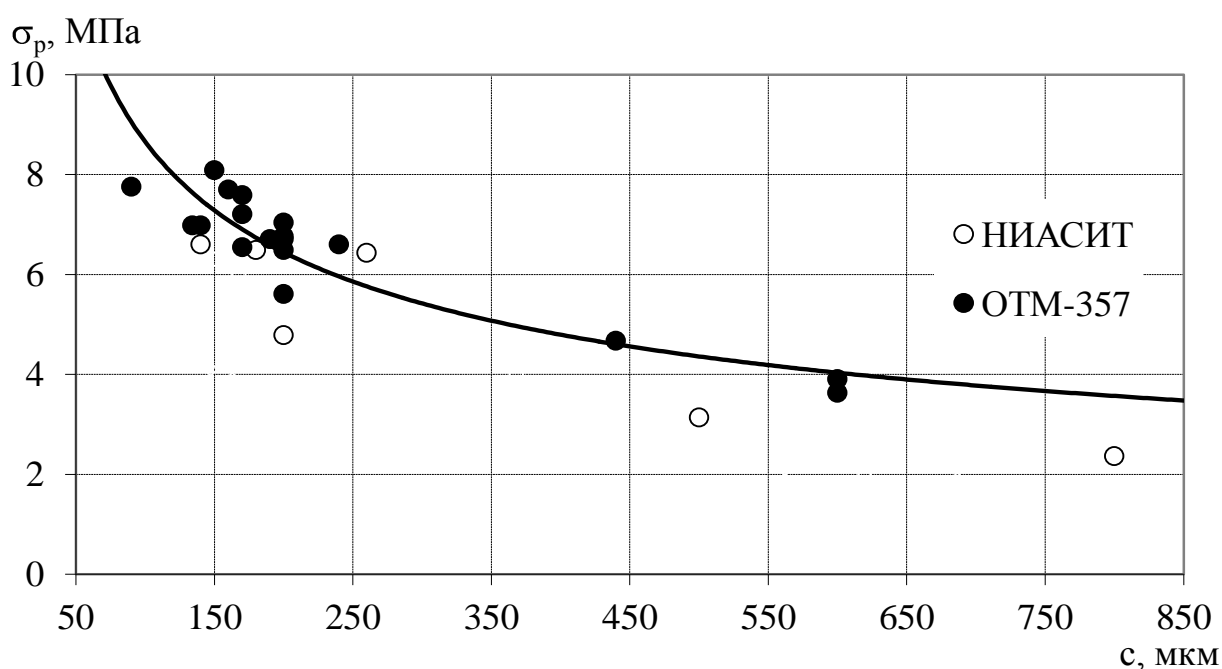


Рис. 2.18 Зависимость предела прочности при растяжении от размера контролирующего ее дефекта

Для средних значений пределов прочности при растяжении 41,1 МПа материала НИАСИТ и 70,2 МПа ОТМ-357 значения размеров дефектов их определяющих составляют ≈ 150 и 120 мкм соответственно.

В табл. 2.15 приведены оценки максимально допустимых размеров критических дефектов, полученные по уравнению (2.39), в структуре материала исследуемых изделий, присутствие которых возможно с сохранением требуемой надежности, вероятности присутствия в оболочке данных дефектов (2.43) и оценки прочностной надежности изделий, полученные по модели (2.44), основанной на плотности распределения дефектов.

Таблица 2.15 – Оценки максимально допустимых размеров критических дефектов в структуре материала, вероятности присутствия в материале данных дефектов и прочностной надежности изделий с учетом распределения дефектов

Материал	Изделие	c_g , мм	$P(c_g)$	R (модель (2.44))
НИАСИТ	ОТИ 395	0,791	0,344127	0,880538
	ОТИ 436	0,771	0,311253	0,965438
ОТМ-357	ОТИ 742	0,966	0,124559	0,959497
	ОТИ 1129	1,686	0,165908	0,939605

Чем больше объем изделия, тем больший размер критического дефекта контролирует его допустимые напряжения. При этом вероятность присутствия критического дефекта в структуре материала варьируется на уровне 31,1...46,0% для материала НИАСИТ и 12,4...16,6% для ОТМ-357. Если же взять менее жесткие требования по надежности – $R_a = 0,99$ для всех изделий, то оценки размеров критических дефектов уменьшатся в среднем на 32,0% и 54,2% соответственно для материалов НИАСИТ и ОТМ-357, а вероятности их присутствия возрастут до 26,6% (НИАСИТ) и 69,0% (ОТМ-357).

Применение при технологическом контроле качества изделий методов неразрушающего контроля позволяет не пропустить дефекты критических размеров в материале керамической оболочки, т.е. отбраковать оболочки с дефектной структурой. Точность рентгенографического и цветного капиллярного методов при определении таких дефектов как трещины, раковины, поры в оболочках после их механической обработки составляет $\pm 0,025 \dots \pm 0,250$ мм в зависимости

от расположения дефектов (внешняя/внутренняя поверхности), ультразвуковых методов – $\pm 0,025 \dots \pm 0,125$ мм. Разрешающая способность лазерной акустической микроскопии достигает $\pm 0,100$ мм, лазерной фотоакустической микроскопии – $\pm 0,050 \dots \pm 0,100$ мм. Метод получения слепка применяют для выявления дефектов, расположенных в любом месте на любой поверхности с точностью измерения $\pm 0,020$ мм.

Сравнение оценок прочностной надежности, полученных по модели Вейбулла (2.10) с использованием только растягивающих напряжений (табл. 2.8), с оценками по модели (2.44), основанной на учете плотности распределения дефектов в структуре материала оболочек (табл. 2.15), показывает, что последняя дает меньшие значения оценок надежности. Вероятно, это связано с небольшим экспериментальным материалом, на основе которого были найдены параметры функций плотности распределения дефектов в структурах материалов НИАСИТ и ОТМ-357. Работы в данном направлении следует продолжить после проведения достаточного количества фрактографических и микроструктурных исследований образцов керамик.

На основе проведенного исследования разработана методика оценки максимально допустимого размера дефекта (ПМ 596.1665-2008 «Оценка критического размера дефекта и вероятности разрушения материала в керамическом изделии»), которая активно используется при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в НПК «РПО» ОАО «ОНПП «Технология».

2.5.2. Модель разрушения Мак-Клинтока с экспоненциальным распределением наибольших критических дефектов

Другим подходом, увязывающим целостность материала оболочки изделия с характерным размером элемента микроструктуры или дефекта в ней, является

статистическая модель, разработанная Мак-Клинтоком [69] и основанная на экспоненциальной функции распределения размеров критических дефектов¹¹

$$\lim_{c \rightarrow \infty} g(c) = ae^{-\alpha c}. \quad (2.48)$$

На основе модельных представлений о статистическом распределении зернограничных трещин Мак-Клинток определил вероятность разрушения при напряжении меньше или равном σ как

$$P(\sigma) = 1 - \exp\left\{-\frac{Aa}{S} \exp\left(-\frac{b}{(\sigma/\sigma_0)^2}\right)\right\}, \quad (2.49)$$

где S – площадь элемента структуры (поверхности зерна или дефекта в микро-структуре) материала; a и b – параметры распределения; $\sigma_0 = K_{IC}/(2\sqrt{c})$ – предел прочности образца, содержащего единичную изолированную трещину длиной c .

Мак-Клинток исследовал свою теорию при отношении площадей A/S от 10^2 до 10^5 , т.е. для правомерного использования данного подхода рассматриваемая область поверхности изделия из керамики должна содержать порядка 10^3 элементов ее структуры [14].

Значение площади S зависит от размера d элемента структуры материала (зерна), который, в свою очередь, определяет размер дефекта (трещины) c , т.е. $c \approx d$ [94]. Тогда предложенная Мак-Клинтоком зависимость величины S от вероятности существования в элементе трещины размером c (w) выглядит следующим образом

$$S \approx d^2 / \sqrt{w}, \quad (2.50)$$

при условии, что вероятность w мала по сравнению с единицей.

Параметры распределения a и b связаны с вероятностью w следующими выражениями

¹¹ Данный материал опубликован в [92, 93].

$$a = \frac{\sqrt{w}}{0,5 - 1/\ln w}, \quad b = -\ln w. \quad (2.51)$$

Данные параметры можно определить несколькими способами. Математически, они могут быть найдены из закона распределения дефектов в материале. Кроме этого их можно определить из экспериментальных данных с помощью моды и квантилей эмпирического распределения.

Из уравнения (2.49) выражение для оценки предела прочности при вероятности разрушения P_f имеет вид

$$\sigma(P) = \sigma_0 \sqrt{\frac{b}{\ln\left(\frac{Aa}{S} / (-\ln(1 - P_f))\right)}}, \quad (2.52)$$

что справедливо для достаточно больших отношений площадей или для достаточно малых значений вероятности P_f . Тогда отношение верхней и нижней квантилей, обозначенное r , равно

$$r = \frac{\sigma_{0,75}}{\sigma_{0,25}} = \sqrt{\frac{\ln \frac{Aa/S}{-\ln 0,75}}{\ln \frac{Aa/S}{-\ln 0,25}}}, \quad (2.53)$$

откуда

$$\frac{Aa}{S} = \ln 4 \left(\frac{\ln 4}{\ln(4/3)} \right)^{1/(r^2 - 1)}. \quad (2.54)$$

В то же время, как следует из функции распределения Вейбулла,

$$r = \frac{\sigma_{0,75}}{\sigma_{0,25}} = \frac{\left(\frac{-\ln(1 - 0,75)}{V_{ef}} \right)^{1/m} \sigma_c}{\left(\frac{-\ln(1 - 0,25)}{V_{ef}} \right)^{1/m} \sigma_c} = \left(\frac{\ln 0,25}{\ln 0,75} \right)^{1/m} \approx 4,82^{1/m}. \quad (2.55)$$

Представленные на рис. 2.19 отношения верхней и нижней квантилей, полученные по результатам испытаний на трехточечный изгиб и осевое растяжение образцов различных размеров кварцевой и стеклокерамики, удовлетворительно согласуются с зависимостью (2.55) – различия составляют 0,0...13,7 %.

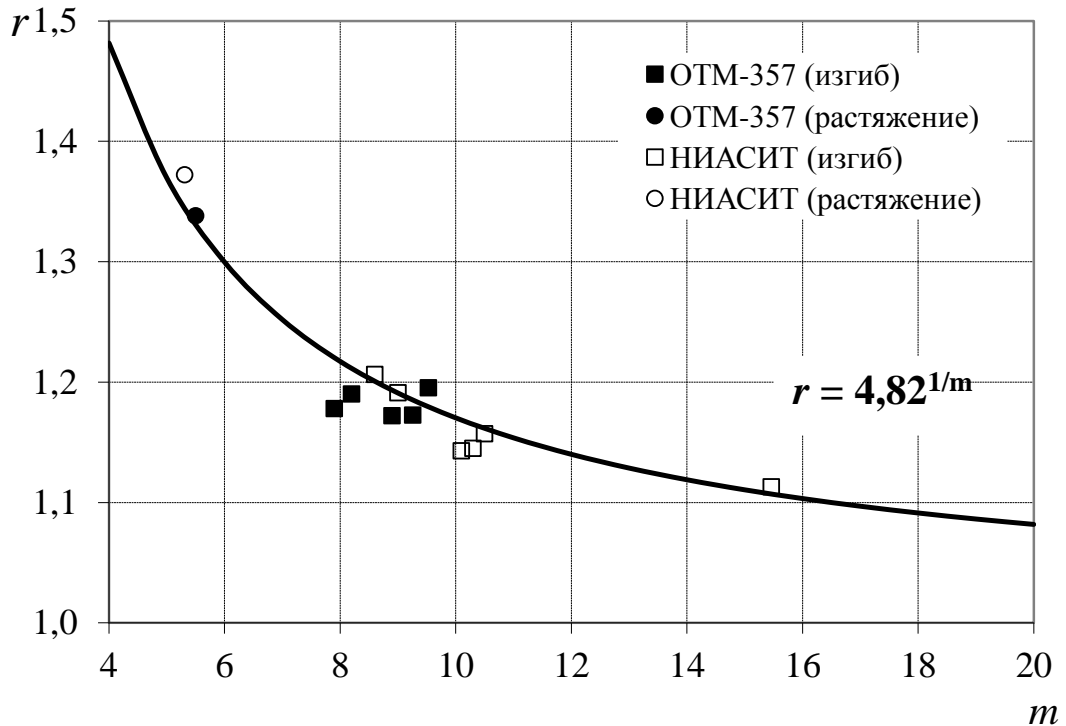


Рис. 2.19 Зависимость отношений квантилей от модуля Вейбулла (точки – экспериментальные значения)

Подставляя (2.50), (2.55) и выражение для параметра a из (2.51) в (2.54), получим

$$\frac{w}{0,5 - 1/\ln w} = \frac{\ln 4 \left(\frac{\ln 4}{\ln(4/3)} \right)^{1/(4,82^{2/m} - 1)}}{A/d^2}, \quad (2.56)$$

откуда, зная m и отношение площади изделия к квадрату размера зерна, можно определить вероятность w и, следовательно, параметры a и b .

На рис. 2.20 представлены зависимости $A/S = f(m)$, полученные для напряженной площади поверхности оболочки изделия $A = S_{ef} = 0,040 \text{ м}^2$ и S , рассчитанного по уравнению (2.50) для различных размеров элементов структуры материала d . Как видно из этого рисунка отношение A/S удовлетворяет модели Мак-Клинтока.

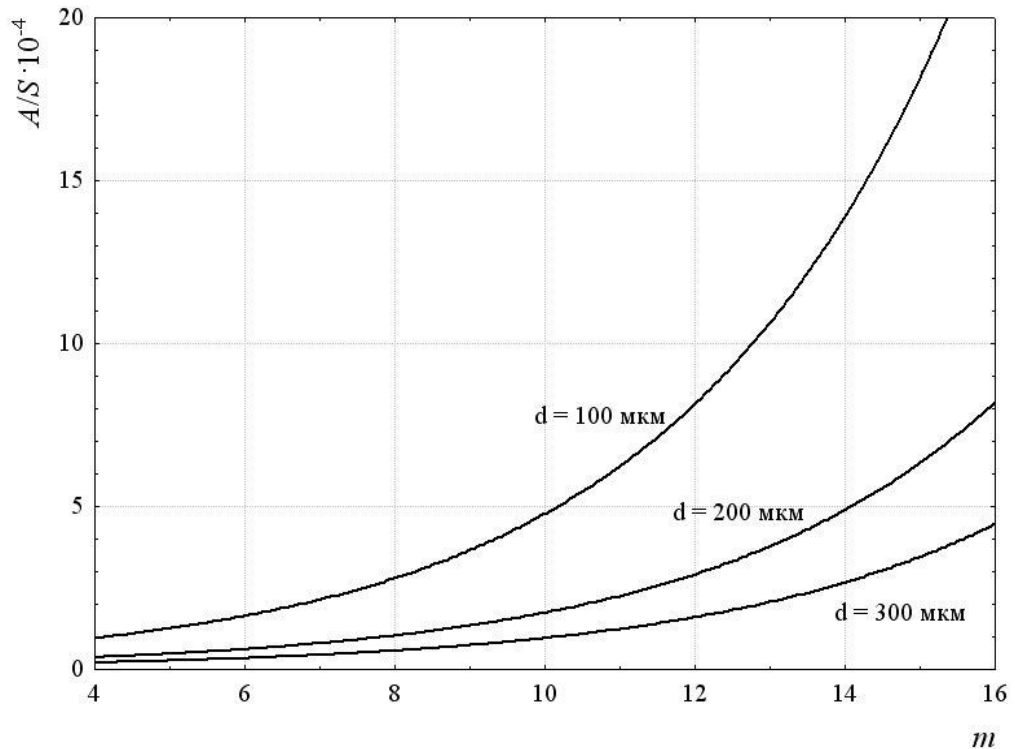


Рис. 2.20 Зависимость отношения площадей изделия и элемента структуры от модуля Вейбулла

На рис. 2.21 приведена зависимость w от отношения A/d^2 по уравнению (2.54) для модулей Вейбулла m равных 10 и 12, которую можно аппроксимировать степенными уравнениями $y = 201,73x^{-1,0162}$ и $y = 73,545x^{-1,0162}$ соответственно¹². Для рассматриваемых изделий вероятность w имеет порядок $10^{-5} \div 10^{-3}$.

Тогда, как указано в [94], коэффициент запаса прочности η можно оценить с учетом допустимого уровня вероятности разрушения P_f как

$$\eta = \frac{\sigma(P_f)}{\sigma_{\max}} = \chi \frac{\sigma_{0,5}}{\sigma_{\max}}, \quad (2.57)$$

где множитель $\chi = \sigma(P_f)/\sigma(0,5)$ корректирует величину коэффициента запаса прочности в зависимости от требуемой надежности материала изделия.

¹² Для рассматриваемых элементов ЛА A находится в интервале $10^4 \div 10^5$, $d^2 \sim 10^{-1}$, и, следовательно, $A/d^2 \sim 10^6 \div 10^7$.

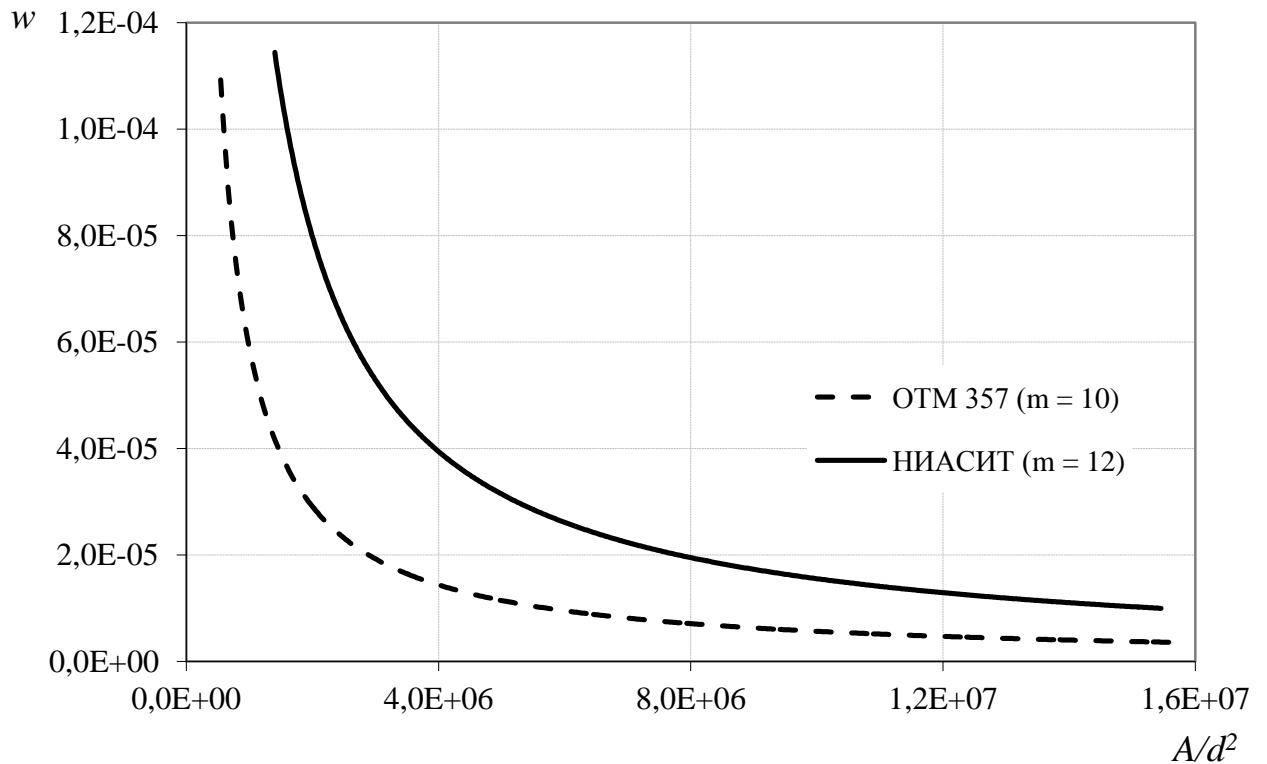


Рис. 2.21 Зависимость вероятности w от отношения A/d^2 (2.54)

Согласно уравнению (2.52) коэффициент χ может быть вычислен из соотношения

$$\chi = \sqrt{\frac{\ln \frac{Aa/S}{-\ln(1-0,5)}}{\ln \frac{Aa/S}{-\ln(1-P_f)}}}. \quad (2.58)$$

Значение коэффициента χ , а, соответственно и значение коэффициента запаса прочности, уменьшаются с увеличением требуемой надежности материала, отношения размеров изделия и элемента его структуры (дефекта) и ухудшением однородности структуры (дефектности).

В табл. 2.16 приведены оценки корректирующего коэффициента χ , коэффициента запаса прочности и прочностной надежности исследуемых типов изделий из материалов НИАСИТ и ОТМ-357 и при величине d , равной критическому размеру дефекта (c_g в табл. 2.15).

Таблица 2.16 – Оценки корректирующего коэффициента χ , коэффициента запаса прочности и надежности исследуемых изделий

Материал	Изделие	$A, \text{ м}^2$	χ	η	R (модель (2.47))
НИАСИТ	ОТИ 395	1,856	0,6562	1,28	0,999979
	ОТИ 436	1,350	0,6562	2,01	1,000000
ОТМ-357	ОТИ 742	0,472	0,6892	1,30	0,992966
	ОТИ 1129	1,640	0,6332	1,28	0,999980

Как видно из таблицы, благодаря корректирующему коэффициенту, позволяющему учесть размер критических дефектов в материале, значения коэффициентов запаса прочности и прочностной надежности оказываются несколько заниженными по сравнению с аналогичными, рассчитанными по модели Вейбулла (см. табл. 2.8).

2.5.3. Модель Вейбулла с бимодальным распределением дефектов

Модель наислабейшего звена Вейбулла (2.10) была разработана в предположении одной совокупности дефектов. Однако для технической керамики более типично присутствие двух и более типов дефектов, контролирующих разрушение в определенных областях напряжений. Так, если результаты прочностных испытаний в координатной сетке Вейбулла отклоняются от линейной зависимости, это яркий признак того, что образцы материала содержат разные типы дефектов, каждый из которых обладает собственными параметрами распределения [16, 19]. Следовательно, критическое напряжение будет различным для различного типа дефектов при одинаковом напряженном состоянии, а использование параметров Вейбулла одномодального распределения приведет к необоснованно завышенной или заниженной оценке надежности, и поэтому ориентироваться на такие прогнозы разрушения будет опрометчиво.

Для изделий из кварцевой и стеклокерамики результаты испытаний образцов материалов на трехточечный изгиб, как правило, подчиняются линейной

зависимости в координатах Вейбулла. Однако не исключены случаи нарушения линейности, т.е. проявления разрушения партии образцов от разных совокупностей дефектов, и тогда необходим тщательный анализ.

Учет нескольких совокупностей дефектов существенно усложняет модель разрушения (2.10). Существуют, по меньшей мере, три возможности, по которым образцы могут содержать два типа дефектов: пересекающиеся (П-), непересекающиеся (Н-) и частично пересекающиеся (ЧП-) совокупности дефектов [19].

Пересекающиеся совокупности дефектов – оба типа дефектов (А и В) одновременно присутствуют в каждом образце, т.е. общая вероятность разрушения равна

$$P = 1 - (1 - P_A)(1 - P_B), \quad (2.59)$$

где P_A и P_B – индивидуальные вероятности разрушения для каждого распределения дефектов. При распределении Вейбулла (2.10) P_A и P_B , уравнение (2.59) преобразуется к мультипликативному бимодальному виду

$$P = 1 - \exp \left[- \frac{kV}{V_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{cA}} \right)^{m_A} - \frac{kV}{V_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{cB}} \right)^{m_B} \right], \quad (2.60)$$

где m_A и m_B , σ_{cA} и σ_{cB} – модули Вейбулла и параметры масштаба для дефектов типов А и В соответственно.

На существование двух П-совкупностей дефектов указывает положительная кривизна зависимости $\ln(\ln(1/(1-P))) - \ln \sigma$ (рис. 2.22 А).

Для этой модели при увеличении относительного объема, приводящего за счет действия масштабного эффекта к уменьшению предела прочности, будет преобладать разрушение за счет дефектов, имеющих распределение с меньшим модулем Вейбулла. Т.е. экстраполяция разрушающего напряжения от образцов к изделию должна производиться по величине наименьшего модуля Вейбулла, характеризующего распределение наиболее опасных дефектов.

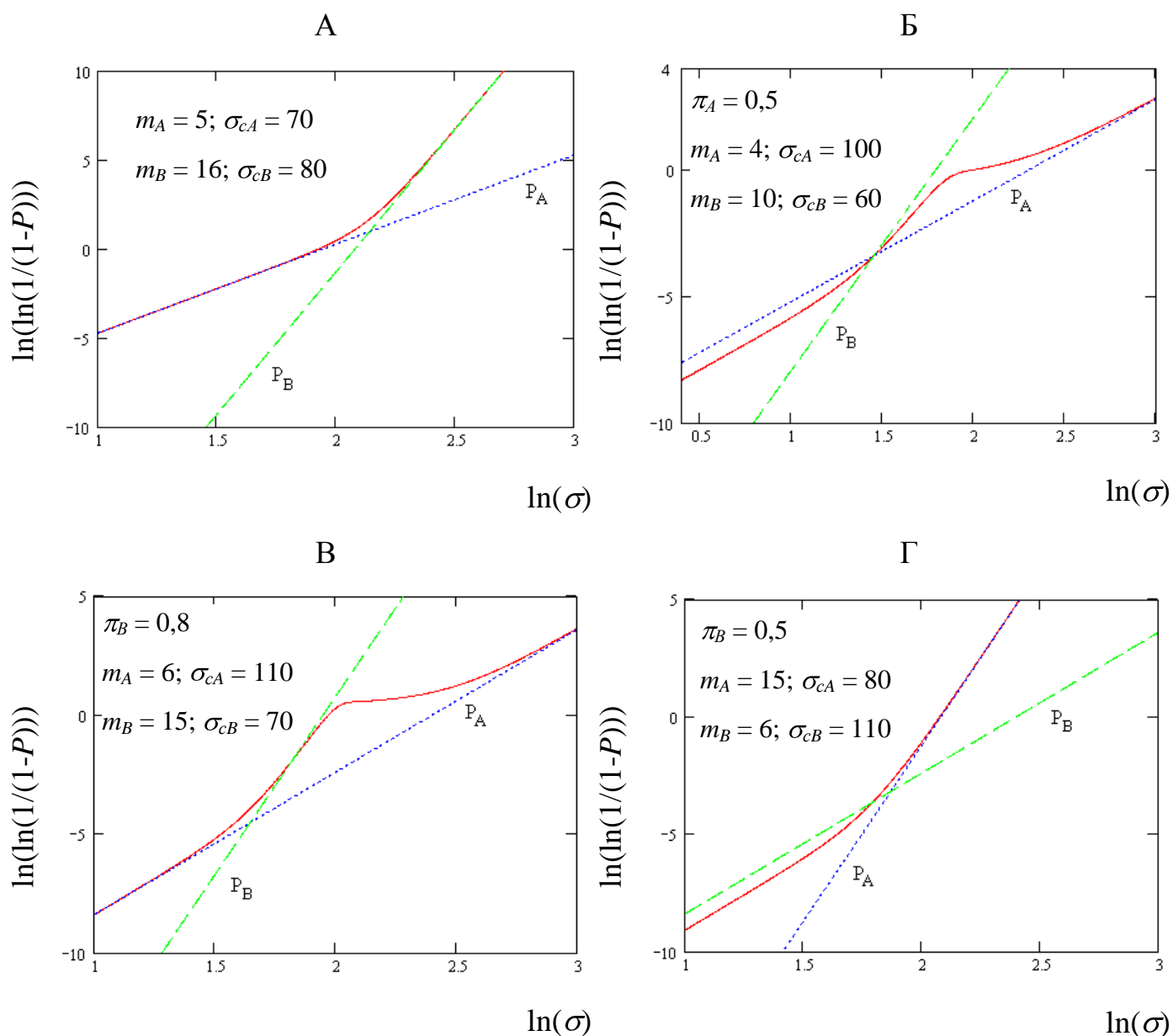


Рис. 2.22 Бимодальные распределения дефектов (координатная сетка Вейбулла): А – пересекающиеся совокупности дефектов; Б – непересекающиеся совокупности дефектов; В-Г – частично пересекающиеся совокупности дефектов

В качестве примера использования модели с П-совокупностями дефектов на рис. 2.23 представлены результаты испытаний на трехточечный изгиб образцов, вырезанных из технологического припуска оболочек изделия ОТИ 395 (материал НИАСИТ), изготовленных в течение полугода, которые, как видно из рисунка, имеют отклонение от линейности. Прямой линией показано распределение Вейбулла при одномодальном распределении дефектов, описываемое

уравнением (2.10), и линией с положительной кривизной – при двухмодальном распределении, задаваемом уравнением (2.60).

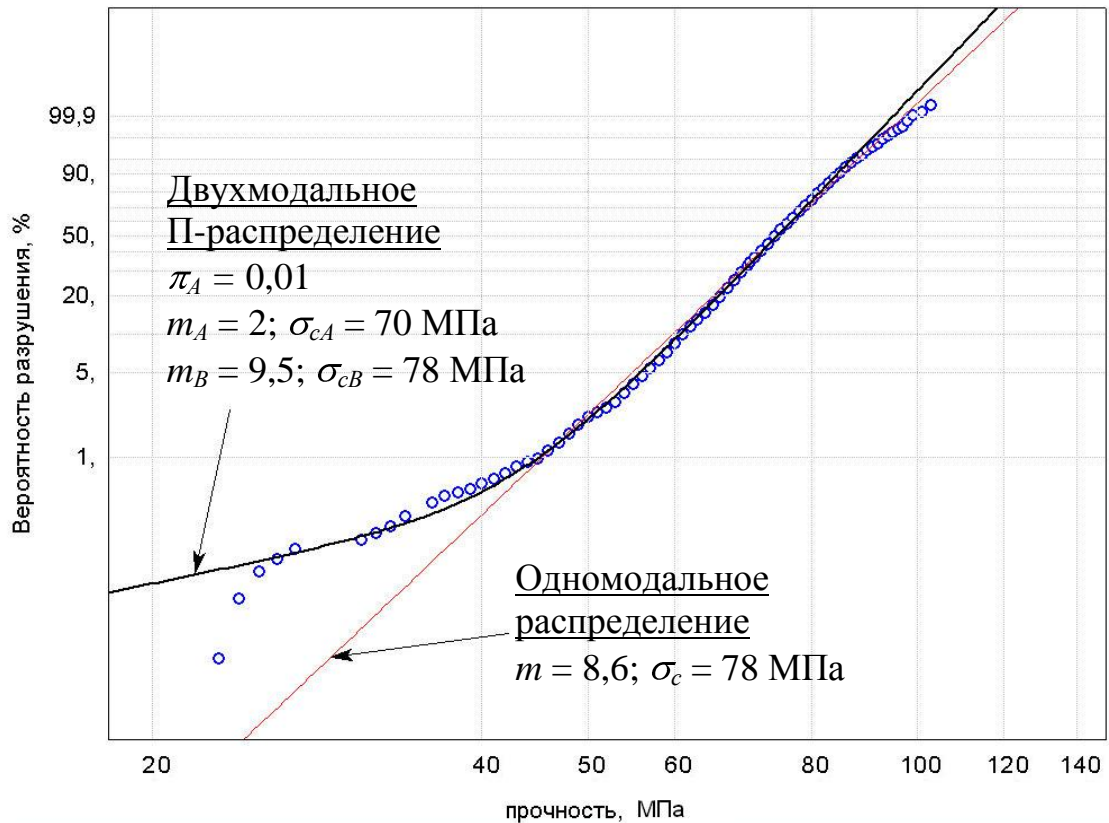


Рис. 2.23 Предел прочности при изгибе образцов, вырезанных из технологического припуска оболочек серийно выпускаемого изделия ОТИ 395 (материал НИАСИТ), в координатной сетке Вейбулла

Оценка пяти неизвестных параметров бимодальной модели производилась методом итерационного поиска Хука-Дживса [95] минимизацией функции квадратов отклонений экспериментальных ($\sigma_{\text{эксн}}$) и вычисленных по модели ($\sigma_{\text{выч}}$) пределов прочности

$$\Theta = \sum_{i=1}^n (\sigma_{\text{эксн}_i} - \sigma_{\text{выч}_i})^2. \quad (2.61)$$

Величина функции Θ равна 113,0 и 18,6 соответственно для одно- и двухмодального распределений, т.е. бимодальное распределение намного лучше описывает предел прочности исследуемой партии образцов материала НИАСИТ.

Как следует из рис. 2.23 существуют области низких (< 40 МПа) и высоких (> 40 МПа) пределов прочности материала, разрушения в которых определяются двумя разными типами дефектов, например, объемными и поверхностными. Но какой участок кривой (с большим или меньшим наклоном) описывает какие дефекты без фрактографических исследований сказать трудно. Однако, распределение с наименьшим модулем Вейбулла (наибольшей изменчивостью) будет предпочтительным для образцов наибольшего размера и с минимальными вероятностями разрушения.

Коэффициент π_A возникает из-за невозможности факторизации эффективных объемов и поверхностей, соответствующих объемным и поверхностным дефектам (в случае если предполагаются именно такие типы дефектов). В данном случае $\pi_A = 0,01$, что говорит о малом содержании дефектов, определяющих область низких пределов прочности материала.

В случае *непересекающихся совокупностей дефектов* часть образцов (π_A) содержит дефекты только типа А, другая часть – $(1-\pi_A)$ – дефекты только типа В, но не оба одновременно. В этом случае вероятность разрушения равна

$$P = \pi_A P_A + (1 - \pi_A) P_B \quad (2.62)$$

и после преобразования

$$P = 1 - \pi_A \exp\left[-\frac{kV}{V_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{cA}}\right)^{m_A}\right] - (1 - \pi_A) \exp\left[-\frac{kV}{V_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{cB}}\right)^{m_B}\right]. \quad (2.63)$$

Данная модель описывает кривые как с положительной, так и с отрицательной кривизной (рис. 2.22 Б). В отличие от П-совокупностей, частота появления дефектов, приводящих к разрушению, здесь не зависит от размеров образца и конфигурации нагрузки. При этом функция распределения с низким модулем Вейбулла управляет комбинированным распределением как для высоких, так и для низких значений напряжений.

На рис. 2.24 приведена отклоняющаяся от линейности зависимость вероятности разрушения от разрушающего напряжения, полученная по результатам испытаний на трехточечный изгиб образцов, вырезанных из технологического

припуска оболочек того же, что и в предыдущем примере, изделия ОТИ 395, но до пропитки их поверхности кремнийорганическими соединениями.

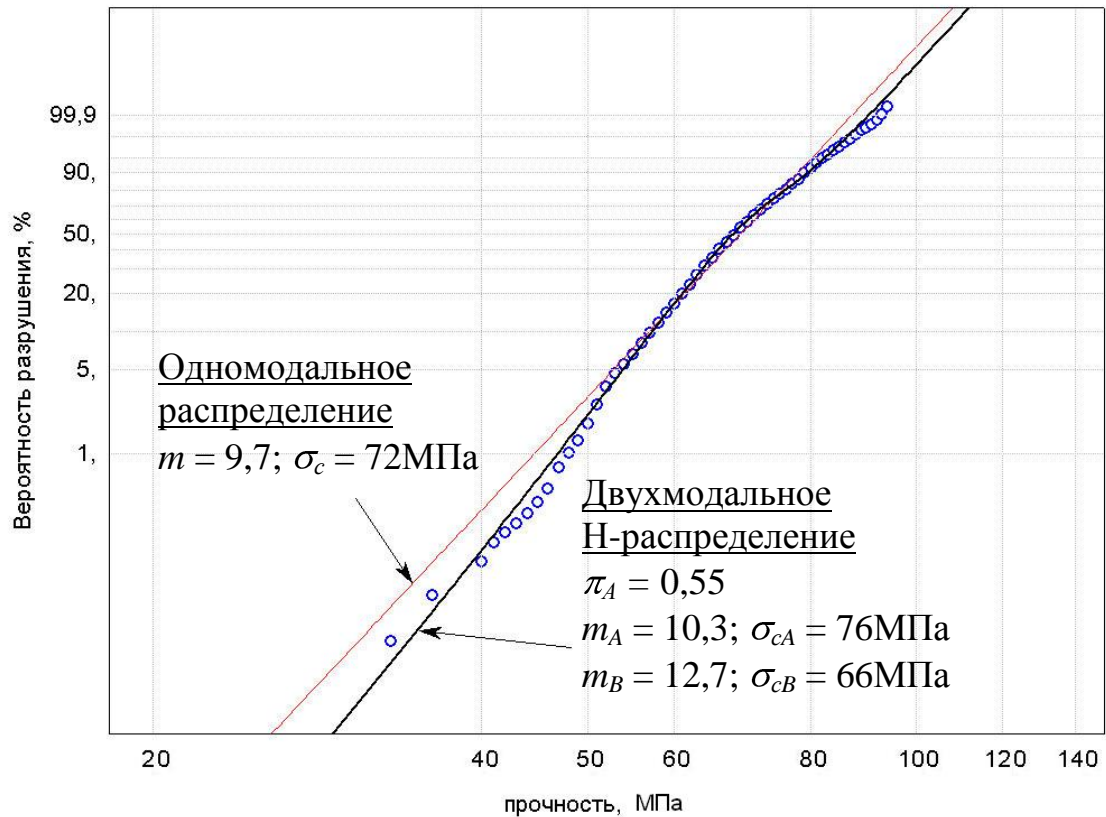


Рис. 2.24 Предел прочности при изгибе образцов, вырезанных из технологического припуска оболочек серийно выпускаемого изделия ОТИ 395 (материал НИАСИТ, до пропитки), в координатной сетке Вейбулла

Двухимодальное распределение лучше подходит к экспериментальным данным: величина функции потерь Θ равна 77,0 и 12,3 соответственно для одно- и двухимодального распределений. Поскольку для Н-совокупностей дефектов функция распределения с низким модулем Вейбулла описывает крайние значения напряжений, именно эти параметры необходимо использовать для прогнозирования надежности изделий.

Также модель (2.63) хорошо подходит для описания результатов испытаний образцов, вырезанных из технологического припуска оболочек изделия ОТИ 742 (материал ОТМ-357), серийно изготовленных в течение года (рис. 2.25): величина функции потерь составляет 128,7 и 13,5 соответственно для одно- и двухимодального распределений.

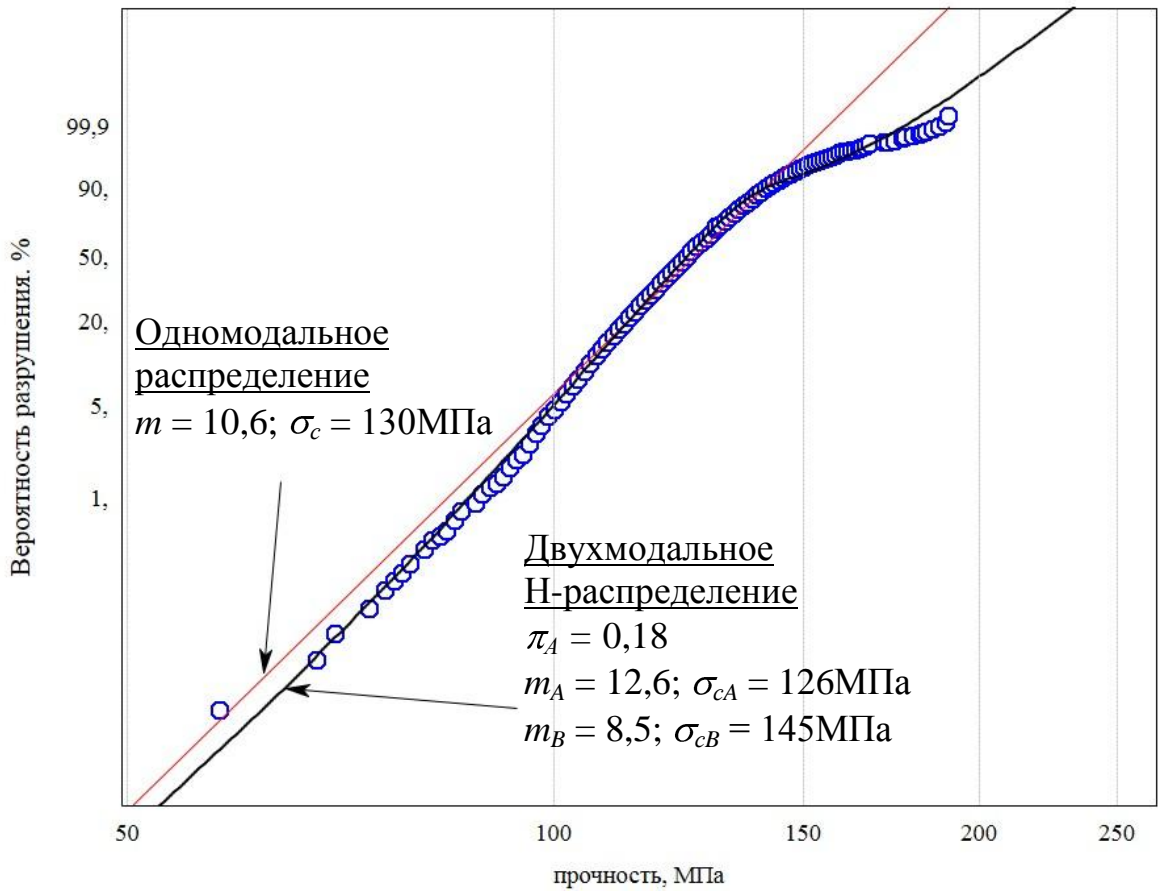


Рис. 2.25 Предел прочности при изгибе образцов, вырезанных из технологического припуска оболочек серийно выпускаемого изделия ОТИ 742 (материал ОТМ-357), в координатной сетке Вейбулла

При *частично пересекающихся совокупностях дефектов* все образцы содержат дефекты типа А ($\pi_A = 1$) и лишь часть образцов (π_B) – дефекты типа В, а вероятность разрушения равна

$$P = 1 - (1 - \pi_B)P_A - \pi_B[1 - (1 - P_A)(1 - P_B)], \quad (2.64)$$

откуда

$$P = 1 - (1 - \pi_B) \exp\left[-\frac{kV}{V_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{cA}}\right)^{m_A}\right] - \pi_B \exp\left[-\frac{kV}{V_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{cA}}\right)^{m_A} - \frac{kV}{V_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{cB}}\right)^{m_B}\right]. \quad (2.65)$$

Очевидно, что при $\pi_B = 1$ этот случай сводится к II-распределениям (2.60).

Дефектами типа В могут быть, например, поверхностные дефекты, появившиеся в результате механической обработки и проявляющиеся только в части образцов.

Зависимость (2.65) с произвольными значениями пяти параметров π_B , m_A , σ_{0A} , m_B и σ_{0B} представлена на рис. 2.22 В-Г, а на рис. 2.26 приведены результаты испытаний на трехточечный изгиб образцов, изготовленных из технологического припуска оболочек изделия ОТИ 436 (материал НИАСИТ), серийно выпущенных в течение года.

Очевидно, что двухмодальное распределение лучше описывает экспериментальные данные, чем одномодальное: величина функции потерь Θ равна 111,4 и 19,3 соответственно для одно- и двухмодального распределений. Однако в области низких пределов прочности двухмодальное распределение вносит существенную погрешность, поэтому проводить экстраполяцию данных необходимо с осторожностью.

Поскольку для ЧП-совокупностей дефектов с функцией распределения положительной кривизны наименьший модуль Вейбулла описывает как высокие, так и низкие значения напряжений, прогнозирование надежности здесь необходимо проводить по меньшему модулю. При этом вероятность разрушения, прогнозируемая по одномодальной модели, будет необоснованно занижена по сравнению с вероятностью разрушения, прогнозируемой по бимодальной модели, т.к. значение модуля Вейбулла для одномодальной модели равно 6,0, для бимодальной меньший $m = 7,9$.

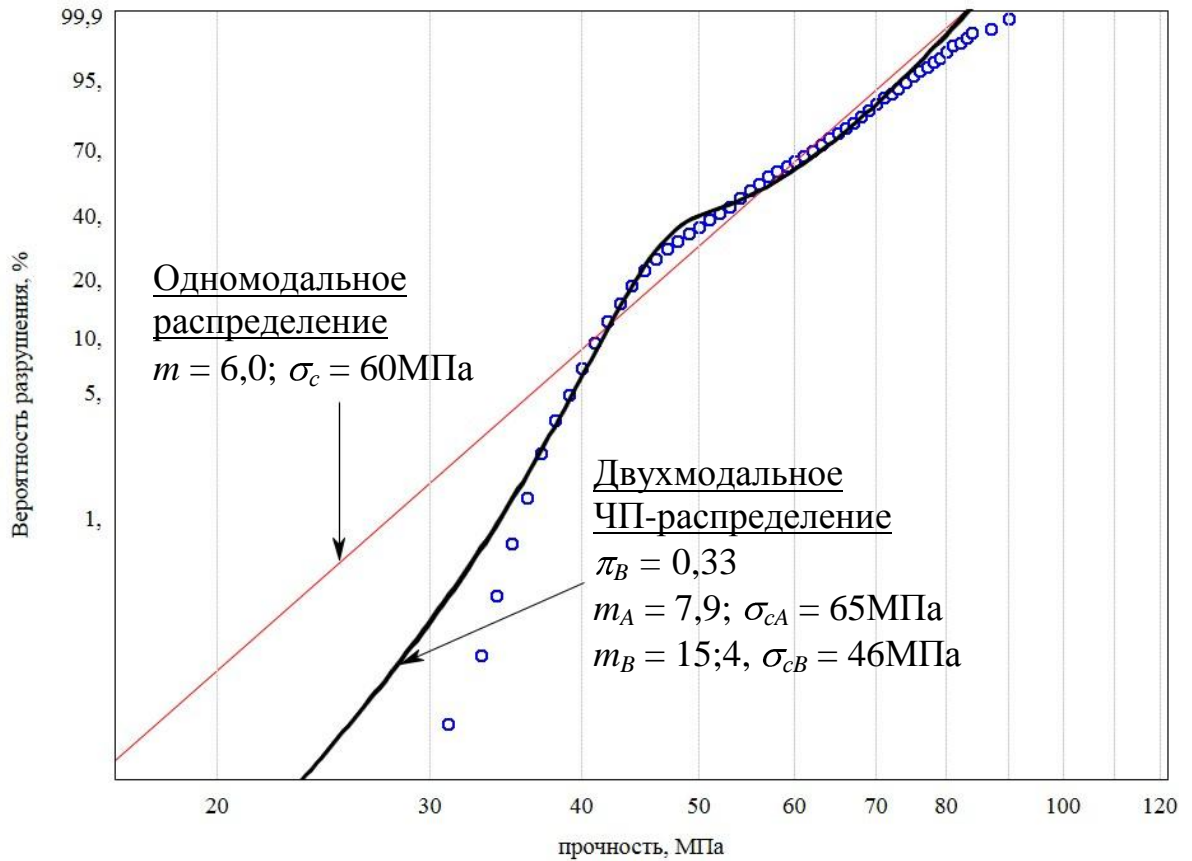


Рис. 2.26 Предел прочности при изгибе образцов, изготовленных из технологического припуска серийно выпускаемых оболочек изделия ОТИ 436 (материал НИАСИТ), в координатной сетке Вейбулла

Однако, как указывается в [19], в большинстве случаев затруднительно найти различия между ЧП- и П- или Н-совокупностями дефектов, поэтому в каждом конкретном случае необходимо этот вопрос рассматривать с физически обоснованной точки зрения.

Так, различный характер нелинейностей изменения пределов прочности, представленных на рис. 2.23 и 2.24, можно описать двухмодальным распределением с ЧП-совокупностями дефектов (2.63), согласно которому возможна следующая интерпретация экспериментальных данных: как в пропитанных, так и в непропитанных образцах материала НИАСИТ присутствуют дефекты типа А (например, объемные), дефекты типа В (например, поверхностные) содержатся лишь в некоторых образцах, при этом их доля составляет $\pi_B = 45\%$.

2.6. Контрольные испытания керамических элементов ЛА оболочечного типа избыточным внутренним давлением

Для обеспечения достаточной эксплуатационной надежности изделий из конструкционной керамики проводят их проверочные (или отбраковочные) испытания. Контроль качества исследуемых элементов ЛА сопровождается большим числом различных испытаний, в том числе их опрессовкой избыточным внутренним давлением для проверки прочности керамической оболочки¹³. Имеются, по крайней мере, два неясных момента в концепции таких испытаний: каким должен быть уровень нагружения при испытаниях и как учесть влияние изменения распределения прочностных показателей после испытаний по сравнению с исходным на прогнозирование прочностной надежности.

Для высоконагруженных изделий выбор уровня давления опрессовки приобретает принципиальное значение. Некорректный выбор ведет либо к недогрузке, при которой нарушается главный принцип этого подхода – отбраковка дефектных изделий, либо к перегрузке и, соответственно, к разрушению или ослаблению изделий малой дефектности. Слишком высокий уровень нагружения при контрольных испытаниях может привести к повреждению структуры материала оболочек и преждевременной выработке его ресурса с позиции длительной прочности, тогда как оптимально выбранная нагрузка позволит уменьшить рассеяние предела прочности керамического материала, отсекая левый «хвост» ее плотности распределения.

Исходя из принципа эквивалентности испытаний, растягивающие напряжения, возникающие в оболочке при опрессовке контрольным давлением, должны быть близки к эксплуатационным, возникающим при полете от аэродинамических нагрузок. Очевидно, что при контрольных испытаниях внутренним давлением не удастся точно смоделировать расчетное распределение напряжений в изделии, возникающее во время воздействия на него аэродинамических нагрузок, но при этом имеется возможность воспроизвести расчетные уровни этих напряжений.

Величину контрольного давления опрессовки можно оценить по известному соотношению Лапласа [98], связывающему значение внутреннего давления p с напряжением разрушения в окружном направлении σ_φ оболочки радиусом r и толщиной стенки h

$$\sigma_\varphi = \frac{pr}{h}. \quad (2.66)$$

Величина минимально допустимых напряжений керамического материала в оболочке σ_θ , рассчитанная по уравнению (2.30), позволяет определить необходимый уровень нагрузки в контрольных испытаниях внутренним давлением. Выразив из (2.66) p и приравняв $\sigma_\varphi = \sigma_\theta$, получим

$$p_{\max} = \frac{\bar{\sigma}_u h}{r \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)} \left(\frac{V_u}{V_{ef}} \times \frac{\ln \frac{1}{R_a}}{2(m+1)^2} \right)^{1/m}. \quad (2.67)$$

Данное выражение представляет собой верхний уровень контрольного давления опрессовки, необходимый для отбраковки оболочек, содержащих критические дефекты и имеющих предел прочности ниже минимально допустимого напряжения керамического материала в оболочке с учетом требуемой надежности R_a .

Для оперативной оценки максимального уровня критического давления опрессовки на рис. 2.27 представлена зависимость давления опрессовки керамической оболочки от модуля Вейбулла и среднего предела прочности образцов при трехточечном изгибе для $R_a = 99,9\%$ и $V_u/V_{ef} = 10^{-3}$.

Полученное по уравнению (2.67) значение p_{\max} необходимо скорректировать, учитывая следующие обстоятельства: возможное снижение предела прочности керамического материала в процессе опрессовки вследствие докритического роста трещины и несовпадение распределения напряжений в оболочке при опрессовке и при воздействии эксплуатационных аэродинамических нагру-

¹³ Данный материал опубликован в [96, 97].

зок. Расчеты напряженно-деформированного состояния оболочек методом конечных элементов показывают, что растягивающие напряжения действуют в объеме оболочке, составляющим от 10 до 40% от ее общего объема V . Учет этих факторов производится умножением величин давления на коэффициент $k_p = 0,70$, полученный на основе анализа распределений пределов прочности материалов НИАСИТ и ОТМ-357, а также литературных рекомендаций по методам контрольных испытаний керамических изделий [42, 50, 99].

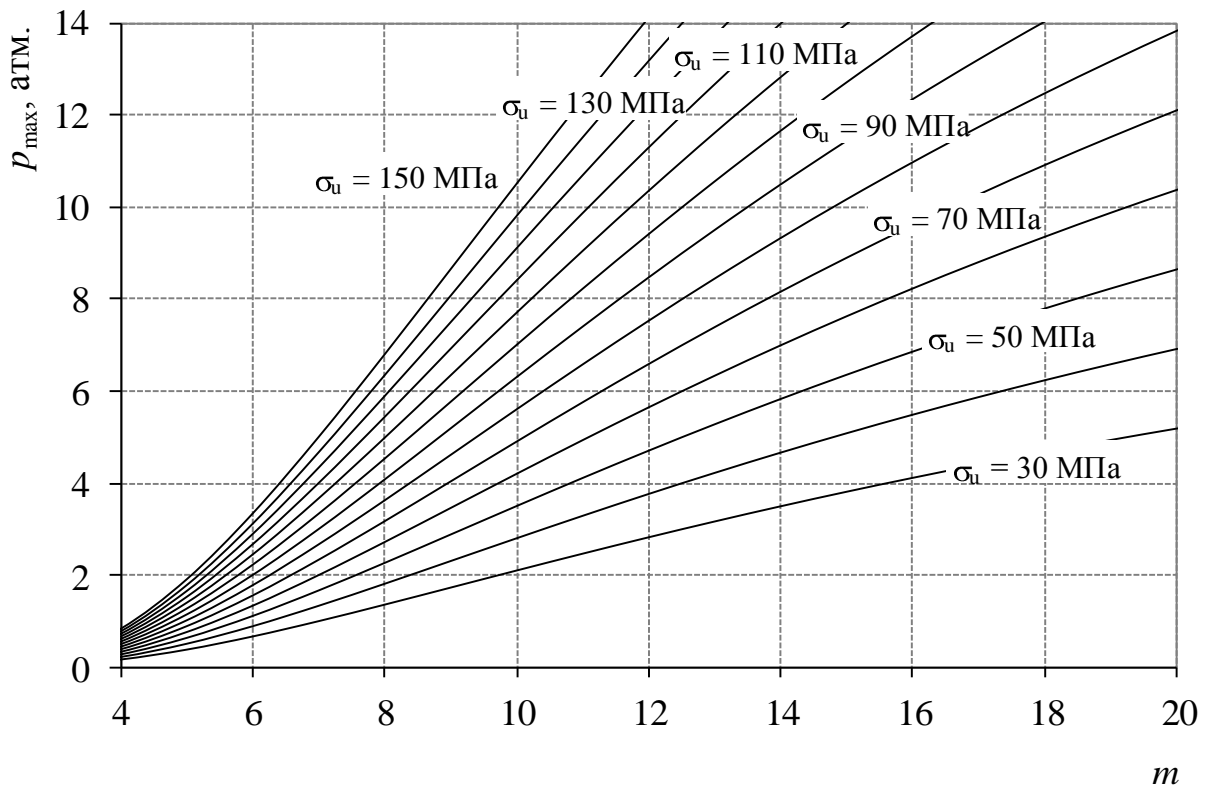


Рис. 2.27 Зависимость максимального уровня давления опрессовки от модуля Вейбулла и среднего предела прочности образцов при изгибе для $R_a = 99,9\%$ и $V_u/V_{ef} = 10^{-3}$

Кроме этого, зная максимальные расчетные напряжения σ_{max} и задаваясь уровнем 70-85% от эксплуатационных при заданном коэффициенте безопасности, можно оценить диапазон изменения уровня критического давления опрессовки, наиболее приемлемый для конкретного изделия

$$[p_{70\%}, p_{85\%}] = \frac{h}{r} \cdot f \cdot [0,70 \dots 0,85] \sigma_{max}, \quad (2.68)$$

где f – коэффициент безопасности.

В табл. 2.17 приведены результаты расчета уровней давления опрессовки, полученные по уравнениям (2.67)-(2.68), и значения давления, установленные в настоящее время для исследуемых изделий из кварцевой и стеклокерамики.

Таблица 2.17 – Оценки давления опрессовки исследуемых изделий

Материал	Изделие	$\frac{h}{r}$	Уровень давления, атм.				
			p_{\max}	p_{\max} при $k_p = 0,70$	$p_{70\%}$ при $\eta = 1,5$	$p_{85\%}$ при $\eta = 1,5$	Уста- новлен- ный в наст.вр.
НИАСИТ	ОТИ 395	0,0484	8,3	5,8	5,7	6,9	6,0
	ОТИ 436	0,0250	4,4	3,1	1,9	2,3	–
ОТМ-357	ОТИ 742	0,0420	10,4	7,3	8,6	10,4	7,0
	ОТИ 1129	0,0276	5,2	3,6	4,2	5,0	5,0

Представленные уровни нагрузок p_{\max} характеризуют величины, выше которых давления выбирать недопустимо в виду необратимости последствий, которые вследствие этого могут возникнуть. Однако, анализ табл. 2.17 показывает, что для изделия ОТИ 1047 значение $p_{85\%}$ при $f = 1,5$ оказалось больше p_{\max} . В таких случаях, характерных для высоконагруженных изделий с жесткими требованиями к их надежности, следует ориентироваться на уровень давления не более p_{\max} , позволяющий реализовать 72% σ_{\max} при $f = 1,5$.

Установленный в настоящее время уровень контрольного давления опрессовки для изделий ОТИ 395 и ОТИ 742 близок к оцененному по предложенному подходу уровню, для изделия ОТИ 1129 является завышенным. При этом следует отметить, поскольку нет полной уверенности в том, что каждая партия хрупкого материала будет иметь одинаковые значения прочностных показателей и параметров Вейбулла, то, вообще говоря, для каждого конкретного изделия необходима их оценка по результатам испытаний соответствующих образ-

цов и лишь после этого рекомендовано устанавливать теоретически обоснованный уровень давления при контрольных испытаниях.

На основе проведенного исследования разработана методика ПМ 596.1666-2008 «Расчет уровня контрольного давления при опрессовке керамических оболочек».

2.7. Надежность керамических материалов при замедленном разрушении. Оценка параметров кинетики роста трещин и прогнозирование долговременной работоспособности материалов

Керамические материалы могут разрушаться в химически агрессивных средах при значениях коэффициента интенсивности напряжений, меньших критического (или соответственно при уровне приложенных напряжений, меньшем уровня разрушающих напряжений в инертной среде) вследствие медленного докритического роста трещины из существующих дефектов.

Время до разрушения керамического материала определяется скоростью v субкритического подрастания трещины до критической длины, соответствующей условию Гриффитса, которая, как было установлено [17], связана с коэффициентом интенсивности напряжений K_I степенным уравнением (кинетическая диаграмма трещиностойкости)

$$v = \frac{dc}{dt} = AK_I^n, \quad (2.69)$$

где A и n – эмпирические константы, зависящие от свойств материала, окружающей среды и температуры. Показатель снижения прочности n характеризует чувствительность материала к субкритическому подрастанию трещины (чем больше значение n , тем в большей степени материал устойчив к замедленному разрушению) и определяется по результатам испытаний на статическую (при постоянной нагрузке) или динамическую (при нагружении или деформировании с постоянной скоростью) усталость. Испытания на динамическую усталость значительно удобнее: они требуют меньших затрат времени, легко реализуемы при наличии жестких испытательных машин, результаты могут быть

экстраполированы на предельные случаи динамического или статического пределов прочности.

Если принять, что время до разрушения t_f состоит только из времени, требующегося для докритического роста трещины из существовавшего ранее дефекта, то уравнение (2.69) можно проинтегрировать, воспользовавшись также связью коэффициента интенсивности напряжений с размером дефекта по уравнению (2.37)

$$\int_{c_i}^{\infty} \frac{dc}{c^{n/2}} = \int_0^{t_f} A \left(\frac{Y}{Z} \right)^n \sigma^n(t) dt, \quad (2.70)$$

откуда разрушающее напряжение σ_f определяется как

$$\sigma_f^{n-2} = \frac{1}{B} \int_0^{t_f} \sigma^n(t) dt, \quad (2.71)$$

где $\sigma(t)$ – изменение напряжения по времени; $B = \frac{2Z^2}{AY^2(n-2)K_{IC}^{n-2}}$. Предполагается также, что во время роста трещины ее форма (т.е. Z) не изменяется.

При статическом нагружении с постоянным напряжением $\sigma(t) = \sigma_a = \text{const}$ выражение для оценки время до разрушения, полученное интегрированием уравнения (2.71), выглядит следующим образом

$$t_{fs} = B \sigma_f^{n-2} \sigma_a^{-n}. \quad (2.72)$$

В случае нагружения с постоянной скоростью изменения напряжения $\sigma(t) = \dot{\sigma}t = E\dot{\epsilon}t$ ($\dot{\epsilon}$ – скорость деформирования) оценка время до разрушения производится по уравнению

$$t_{fd} = (n+1)B \sigma_f^{n-2} \sigma_d^{-n}, \quad (2.73)$$

где $\sigma_d = \dot{\sigma}t_{fd}$.

Последнее уравнение может быть преобразовано к виду

$$\sigma_d^{n+1} = (n+1)B \sigma_f^{n-2} \dot{\sigma} \quad (2.74)$$

или

$$\ln \sigma_d = \frac{\ln[(n+1)B\sigma_f^{n-2}]}{n+1} + \frac{1}{n+1} \ln \dot{\sigma}. \quad (2.75)$$

Методика испытаний на динамическую усталость основана на использовании уравнения (2.75), из которого может быть определена величина n в случае линейной взаимосвязи между логарифмами скорости нагружения (деформирования) и предела динамической прочности (предела прочности, измеренного при заданной скорости нагружения). Практически для определения величины n необходимо провести прочностные испытания серии гладких образцов (без надрезов) в широком диапазоне скоростей нагружения, построить график согласно (2.75) (или аналогичный график, но в зависимости от скорости деформирования – при испытаниях на жестких винтовых машинах) и по углу наклона рассчитать значение n .

Прогнозирование долговременной работоспособности керамических изделий производится с использованием *SPT*- (или *STP*-) диаграмм («напряжение S – вероятность разрушения P – время до разрушения T). Для построения таких диаграмм требуется информация не только о параметрах кинетического уравнения распространения трещины, но и о модуле Вейбулла m .

Из уравнения (2.73) имеем

$$\ln \sigma_f = \frac{1}{n-2} [\ln t_f + n \ln \sigma_d - \ln(B(n+1))]. \quad (2.76)$$

Подставляя (2.76) в линеаризованное представление функции Вейбулла (уравнение (2.13)), получим выражения

$$\ln \ln \left(\frac{1}{1-P_f} \right) = \frac{m}{n-2} \ln t_f + \frac{mn}{n-2} \ln \sigma_d - \frac{m}{n-2} \ln(B(n+1)\sigma_c^{n-2}) \quad (2.77)$$

для построения *SPT*-диаграмм и

$$\ln t_f = -n \ln \sigma_d + \frac{n-2}{m} \ln \ln \left(\frac{1}{1-P_f} \right) + \ln(B(n+1)\sigma_c^{n-2}) \quad (2.78)$$

для построения *STP*-диаграмм.

Эти диаграммы отличаются тем, что в уравнении (2.77) задаваемым параметром является прогнозируемое время до разрушения t_f , а в уравнении (2.78) – вероятность разрушения P_f .

Влияние показателя n на *SPT*-диаграммы заключается в том, что с уменьшением значения n прямые линии $\ln \ln \left(\frac{1}{1 - P_f} \right) - \ln \sigma$ сдвигаются в сторону меньших напряжений. Это происходит вследствие того, что трещина подрастает в процессе нагружения: чем больше времени материал находится под нагрузкой, тем значительнее подрастание трещины, поскольку процесс подрастания – кинетический, термофлуктуационный, происходящий согласно законам кинетики химических реакций при взаимодействии материала с окружающей средой.

Например, при переходе от времени до разрушения t_f к прогнозируемому времени t' : $t' = kt$, величина сдвига линий на *SPT*-диаграммах, наклон которых определяется модулем Вейбулла, составит $-\frac{1}{n} \ln k$. Поэтому для обеспечения надежной эксплуатации изделий из керамики следует стремиться не только к повышению значения модуля Вейбулла, но и к снижению чувствительности материала к замедленному разрушению (увеличению значения показателя n).

Образцы материалов НИАСИТ и ОТМ-357 испытывали на замедленное разрушение методом динамической усталости: нагружение образцов размером $7 \times 7 \times 60$ мм производили в условиях трехточечного изгиба на жесткой испытательной машине UTS-100 Testesysteme GmbH в интервале скоростей перемещения траверсы $\dot{\delta}$ от 0,01 до 10 мм/мин в ИМЕТ им. А. А. Байкова РАН. Расстояние между опорами составляло $l = 53$ мм. Скорость деформирования рассчитывали по соотношению $\dot{\varepsilon} = 6\tilde{h} \dot{\delta} / l^2$, где \tilde{h} – толщина образца.

В результате проведения испытаний были оценены константы усталости n и B , характеризующие процесс докритического роста трещины¹⁴ (табл. 2.18).

Таблица 2.18 – Параметры кинетического уравнения

Материал	n	B
НИАСИТ	65,7	2,46E+07
ОТМ-357	28,6	2,26E+02

Судя по полученным значениям параметра n , материал НИАСИТ характеризуется более высоким сопротивлением к замедленному разрушению, чем ОТМ-357.

Как показано выше, прогнозирование долговременной работоспособности керамических материалов основывается на сочетании статистического распределения пределов прочности в инертной среде и кинетики снижения прочности во времени при докритическом подрастании трещин из существующих структурных дефектов в результате коррозии под напряжением.

На рис. 2.28-2.31 приведены *STP*- и *SPT*-диаграммы, построенные для материалов НИАСИТ и ОТМ-357. Начальные уровни растягивающих напряжений $\bar{\sigma}_p$ были взяты 47,0 МПа для материала НИАСИТ и 64,0 МПа для ОТМ-357¹⁵.

¹⁴ Данный материал опубликован в [100, 101].

¹⁵ Значения $\bar{\sigma}_p$ получены с помощью оценки по модели Вейбулла исследуемых выборок образцов.

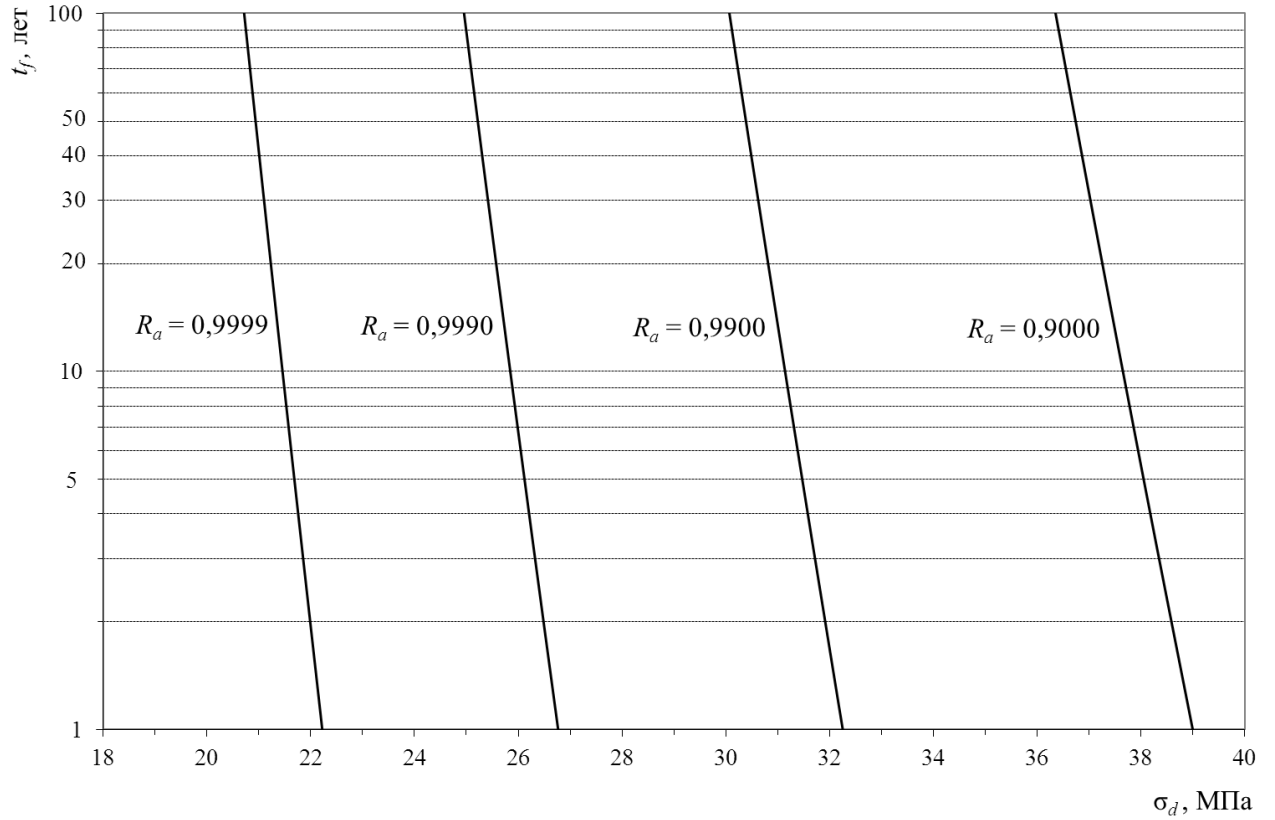


Рис. 2.28 STP-диаграмма для прогнозирования долговременной работоспособности материала НИАСИТ при различных уровнях вероятности безотказной работы

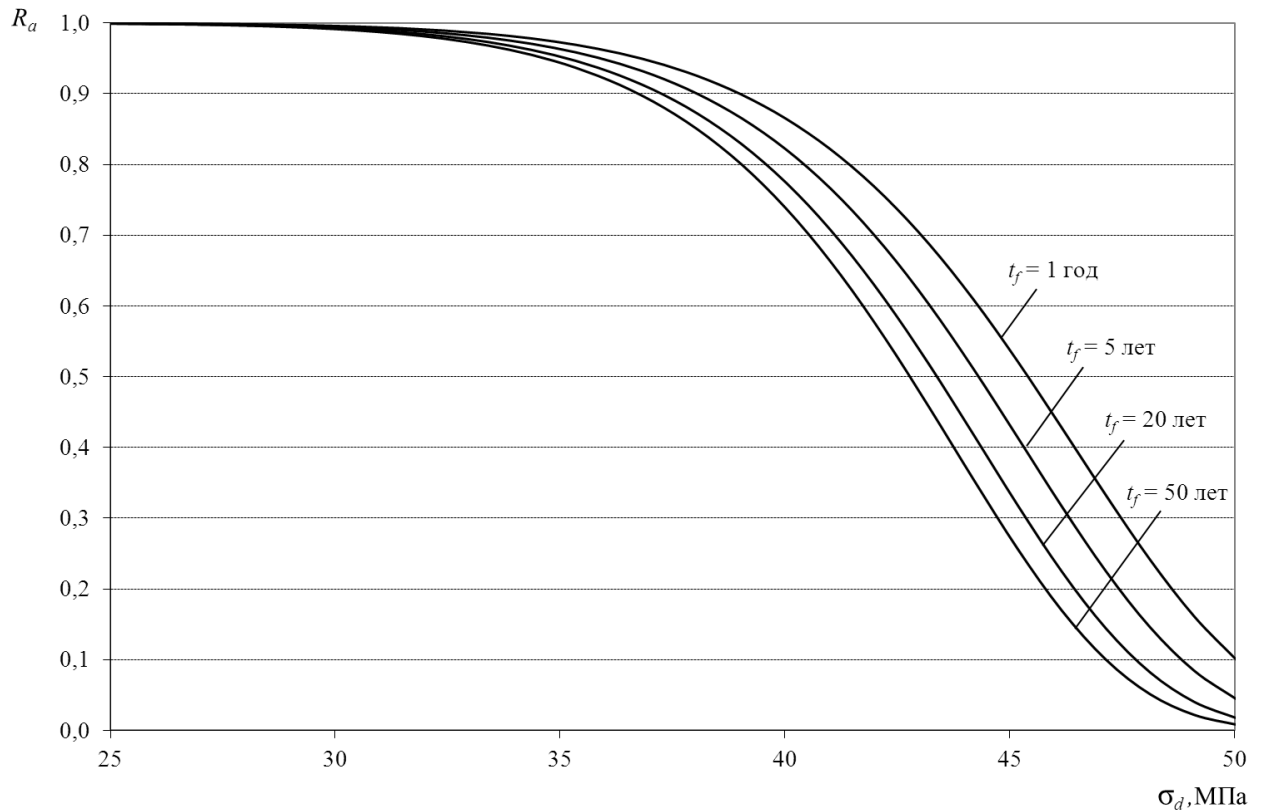


Рис. 2.29 SPT-диаграмма для материала НИАСИТ для различных уровней времени до разрушения

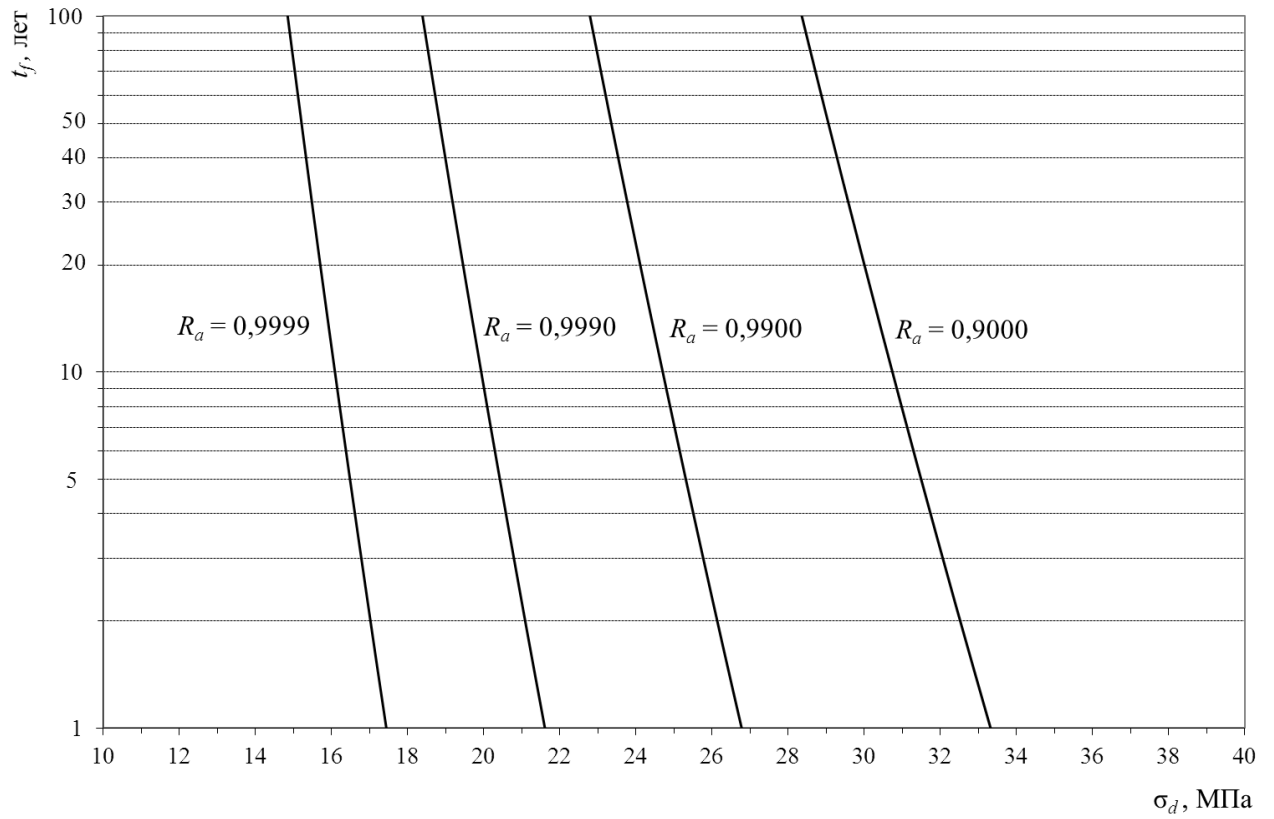


Рис. 2.30 STP-диаграмма для прогнозирования долговременной работоспособности материала ОТМ-357 при различных уровнях вероятности безотказной работы

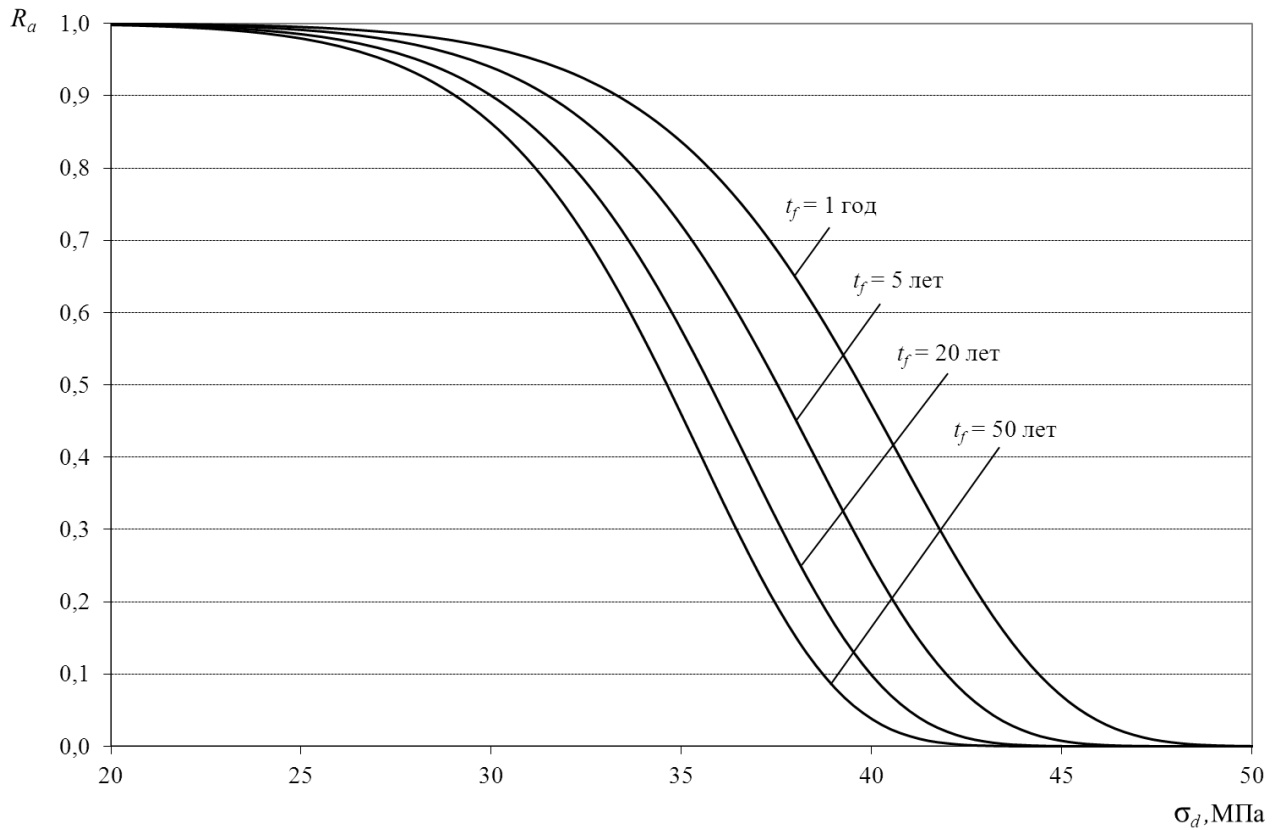


Рис. 2.31 SPT-диаграмма для материала ОТМ-357 для различных уровней времени до разрушения

STP- и *SPT*-диаграммы позволяют оценить на сколько уменьшатся за счет субкритического подрастания трещин максимальные растягивающие напряжения, которые может выдержать материал с заданной вероятностью безотказной работы и в течение заданного временного периода.

Для сравнительной характеристики материалов по их долговременной работоспособности на рис. 2.32 и 2.33 приведены соответственно *STP*-диаграмма при $R_a = 0,999$ и *SPT*-диаграмма при $t_f = 20$ лет; в табл. 2.19 – данные для оценки времени до разрушения и уровни максимально допустимых эксплуатационных напряжений при $R_a = 0,999$ и для срока службы 10 и 20 лет.

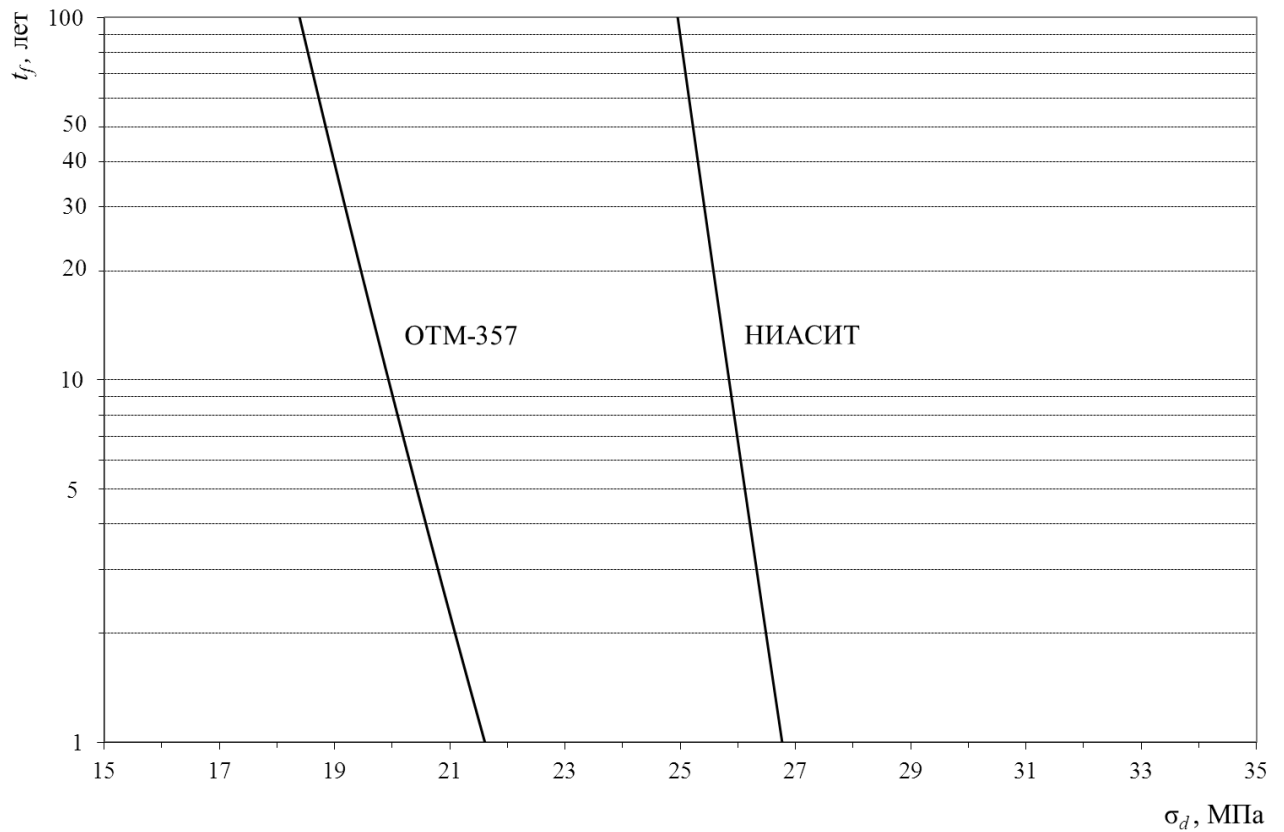


Рис. 2.32 *STP*-диаграмма при вероятности безотказной работы $R_a = 0,999$

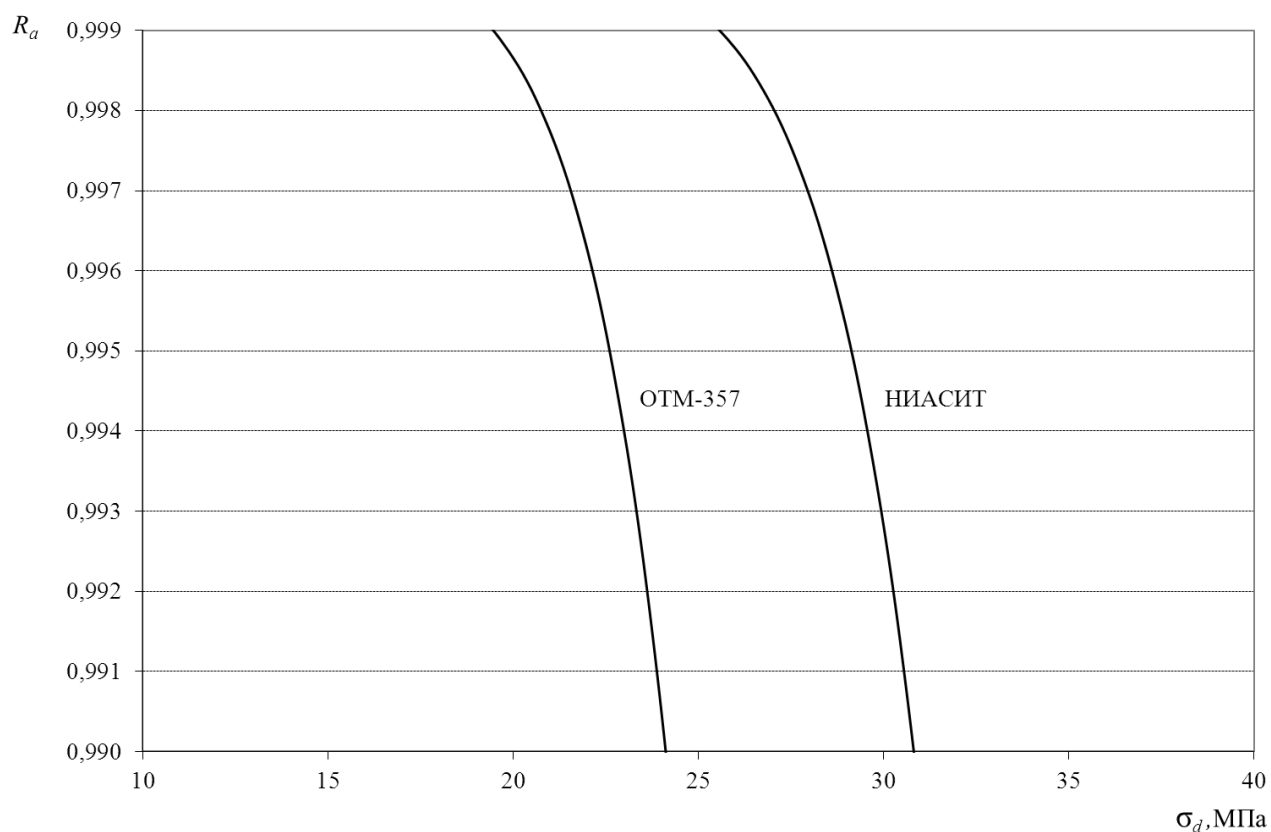


Рис. 2.33 *SPT*-диаграмма для срока службы 20 лет

Таблица 2.19 – Прогнозируемые для срока службы 10 и 20 лет уровни максимально допустимых эксплуатационных напряжений при $R_a = 0,999$ и их процентное снижение относительно исходного предела прочности

Материал	m	σ_c , МПа	$\bar{\sigma}_p$, МПа	σ_d , МПа			
				10 лет	%	20 лет	%
НИАСИТ	12	49,0	47,0	25,8	45,1	25,6	45,5
ОТМ-357	10	67,3	64,0	20,0	68,8	19,9	68,9

Как видно из полученных результатов кварцевая керамика НИАСИТ характеризуется большей долговременной работоспособностью, или более устойчивой к замедленному разрушению, чем стеклокерамика ОТМ-357. Максимально допустимые эксплуатационные напряжения при вероятности безотказной работы не менее 0,999 и для срока службы не менее 10 лет составляют 25,8 и 20,0 МПа соответственно для материалов НИАСИТ и ОТМ-357, т.е. снижение прочностного показателя происходит на 45,1 и 68,8 % соответственно. За сле-

дующие 10 лет эксплуатации допустимые напряжения уменьшаются незначительно – на 0,8 и 0,5%.

Результаты проведенного исследования явились основой для создания методики оценки назначенного ресурса и срока службы элементов ЛА, которая позволяет на стадиях проектирования оценить данные показатели долговечности изделий. Разработанная методика (ПМ 596.1755-2014 «Оценка назначенного ресурса и срока службы антенных обтекателей летательных аппаратов») внедрена (Приложение А) и активно используется для подтверждения установленных в техническом задании уровней соответствующих показателей с целью принудительного заблаговременного прекращения использования изделия по назначению, исходя из требований безопасности и/или технико-экономических соображений.

2.8. Выводы и рекомендации

1. Подтверждена правомерность использования модели наислабейшего звена Вейбулла для анализа прочностных показателей двух исследуемых керамических материалов – кварцевой керамики НИАСИТ и стеклокерамики ОТМ-357.

2. В качестве метода оценки параметров распределения Вейбулла рекомендован 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.

3. При использовании модели наислабейшего звена для прогноза разрушения элементов ЛА из керамических материалов НИАСИТ и ОТМ-357 необходимо иметь репрезентативные выборки образцов для испытаний на прочность. Количество образцов определяется требуемой точностью анализа, техническими и финансовыми возможностями. Наиболее приемлемые по перечисленным критериям оценки дают выборки, размером не менее 30.

4. На основе экспериментальных данных и модели Вейбулла установлены масштабные зависимости прочности исследуемых керамических материалов, которые позволяют прогнозировать предел прочности натурального изделия по результатам прочностных испытаний образцов материалов, а также проводить взаимные оценки пределов прочности при разных схемах нагружения.

5. Установлено, что для прогнозирования предела прочности при растяжении материалов НИАСИТ и ОТМ-357 наиболее подходящими являются модель Вейбулла с использованием результатов испытаний на трехточечной изгиб.

6. Разработана методика оценки допустимого напряжения материалов НИАСИТ и ОТМ-357 для изделий с заданными уровнями нагружения и надежности. Методика также позволяет оценить минимально допустимый предел прочности при растяжении материала в изделии, обеспечивающий его несущую способность при заданных уровнях нагружения и надежности, и спрогнозировать коэффициент запаса прочности (с учетом требуемой надежности).

7. Найдены функции плотности распределения размеров дефектов в материалах НИАСИТ и ОТМ-357, оценены размеры максимально допустимых критических дефектов и прочностная надежность исследуемых изделий по модели Вейбулла с учетом дефектности материалов, рассмотрены случаи бимодальности распределения размеров дефектов.

8. Исследовано применение статистической модели Мак-Клинтока, увязывающей целостность материала изделия с характерным размером элемента микроструктуры, для оценки прочностной надежности изделий. Данная модель позволяет оценить размер структурного элемента керамического материала и оптимизировать процесс разработки технологии получения новых керамических материалов с априори заданными прочностными свойствами.

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

10. На основе теоретических исследований и экспериментальных данных построены STP- и SPT-диаграммы прогнозирования замедленного разрушения и долговременной работоспособности материалов НИАСИТ и ОТМ-357 в элементах ЛА.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕМЕНТОВ ЛА ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

3.1. Технологическая надежность элементов ЛА из керамических материалов

В проблеме обеспечения надежности сложной техники решающую роль играют такие недостатки производства, как низкая технологическая дисциплина, несовершенство технологии, малоэффективный контроль, нестабильность процессов, приводящие по некоторым оценкам к 15-70% всех случаев отказов [102]. Эти недостатки во многом зависят от качества технологической отработки изделия при его создании на этапе НИОКР.

Основная стратегия достижения качества и надежности любых изделий, в том числе и авиационно-космической техники, основана на применении глубоких исследований процессов разрушения и старения материалов, снижения работоспособности конструкций под нагрузкой с подтверждением показателей надежности на ограниченном количестве натурных испытаний. Такой подход предусматривает применение математического моделирования рабочих процессов изделия, проведение ускоренных испытаний, использование неразрушающих и диагностических методов и средств контроля, современной экспериментальной базы, средств автоматизации и вычислительной техники.

Стратегию отработки нового изделия можно условно представить в виде пирамиды, основание которой отражает большой объем научно-исследовательских работ и теоретических расчетов, средняя часть – опытно-конструкторские работы, а вершина – единичные испытания натурных образцов для подтверждения работоспособности и надежности. Если же стратегия не соблюдается, т.е. если предварительные исследования проведены в недостаточном объеме, то отказ натурального изделия влечет за собой проведение длительных и дорогих исследований для поиска и устранения причин отказа.

Таким образом, технологическая обработка должна включать в себя такие работы как проведение научно-исследовательских работ в качестве научно-технического задела; разработку высокоэффективных материалов и процессов; подготовку опытного производства параллельно с разработкой конструкторской документации; создание специализированного прецизионного оборудования для повышения технологичности и надежности; исследование свойств материалов и физических явлений в технологических процессах и т.д.

Технологические процессы (ТП) формируют свойства материалов, закладываемых в изделие, поэтому нестабильность этих процессов выражается в увеличении интенсивности повреждения материала под нагрузкой. В связи с этим при обработке на надежность большое значение приобретают исследования динамики изменения параметров материала и изделий под действием технологических факторов. Это особенно важно для высоконагруженных изделий, имеющих рабочие напряжения или нагрузки, близкие к расчетным.

Параметры ТП, такие как последовательность операций, способы и режимы формовки, обжига, механической обработки, применяемое оборудование, методы контроля формируют параметры изделия – геометрические размеры, форму, качество поверхности, свойства материала. Эти параметры в совокупности придают изделию необходимые свойства, обуславливающие его пригодность в соответствии с назначением. Следовательно, через параметры ТП можно оказывать воздействие на эксплуатационные характеристики изделия и показатели его надежности.

Процесс будет считаться надежным только в том случае, если его работоспособное состояние позволяет одновременно удовлетворить условиям по качеству продукции, производительности и затратам. Для такой продукции, как головные радиопрозрачные элементы ЛА, изготавливаемой сравнительно малыми сериями, лимитирующим является качество продукции. В этом случае технологическая надежность процесса изготовления изделий определяется точностью и стабильностью выходных параметров материала изделия и его бездефектностью.

При этом *точность* можно рассматривать как свойство технологического процесса, обеспечивающее близость действительных и номинальных значений параметров изготавливаемого материала, т.е. соответствие поля рассеяния показателя качества при изготовлении заданному полю допуска и его расположению [103].

Стабильность является свойством технологического процесса сохранять постоянство распределений вероятностей контролируемых параметров материала изделия и самого процесса в течение некоторого интервала времени функционирования процесса.

Таким образом, точность, характеризующая технологический процесс в некоторый фиксированный момент времени, является составной частью стабильности, описывающей процесс в динамике. Нестабильность выражается в изменении от изделия к изделию параметров статистических распределений (среднего значения, среднеквадратического отклонения и др.).

Достигнуть высокой точности и стабильности технологического процесса можно за счет установления закономерностей, позволяющих управлять качеством материала. Это возможно благодаря детальному изучению физической природы формирования оптимальной структуры и свойств керамического материала на основе планирования эксперимента и построения многофакторных математических моделей, описывающих эти закономерности.

Следует отметить, что при опытном производстве изделий наблюдение за стабильностью при отработке на надежность должно являться обязательной систематической процедурой. Это будет способствовать выявлению тенденций изменения точности и прогнозированию стабильности процесса в серийном производстве [104].

Эффективной формой управления качеством является применение статистических методов, позволяющих предупреждать появление брака или минимизировать его еще в процессе производства. Статистические методы позволяют оценить не только качество готового изделия, но и текущее состояние ТП, и соответственно его надежность. Отсюда первостепенное значение приобретает

сбор необходимых статистических данных в опытном и серийном производстве. При этом большой технико-экономический эффект создает контроль не столько самих параметров готового изделия, сколько контроль параметров ТП его изготовления.

Разработка системы оценки качества, в том числе и стабильности, ТП производства изделий на основе статистических методов включает в себя следующие задачи:

- определение параметров точности процесса (полей рассеяния, центров рассеяния и среднеквадратических отклонений);
- анализ факторов, определяющих законы распределения параметров качества и степень их влияния на точность с использованием методов корреляционного и регрессионного анализов;
- выбор метода регулирования процесса;
- определение контрольных границ для параметров процесса.

Весь спектр применяемых статистических методов для анализа производства можно разделить на три группы [103]: статистический анализ состояния ТП; статистическое регулирование ТП; статистический приемочный контроль.

Любой анализ качества и поиск причин возникновения брака необходимо начинать с построения причинно-следственной диаграммы (диаграммы Исикавы), которая наглядно демонстрирует все промахи ТП и способы их устранения. Типичная диаграмма при анализе качества оболочек изделий ЛА изображена на рис. 3.1.

Факторы, прямо или косвенно влияющие на качество изделий, объединены в группы: исходный материал, технология, оборудование, труд и условия труда. Управляя данными факторами, можно влиять на причины нарушения качества и, в итоге, на конечный результат.

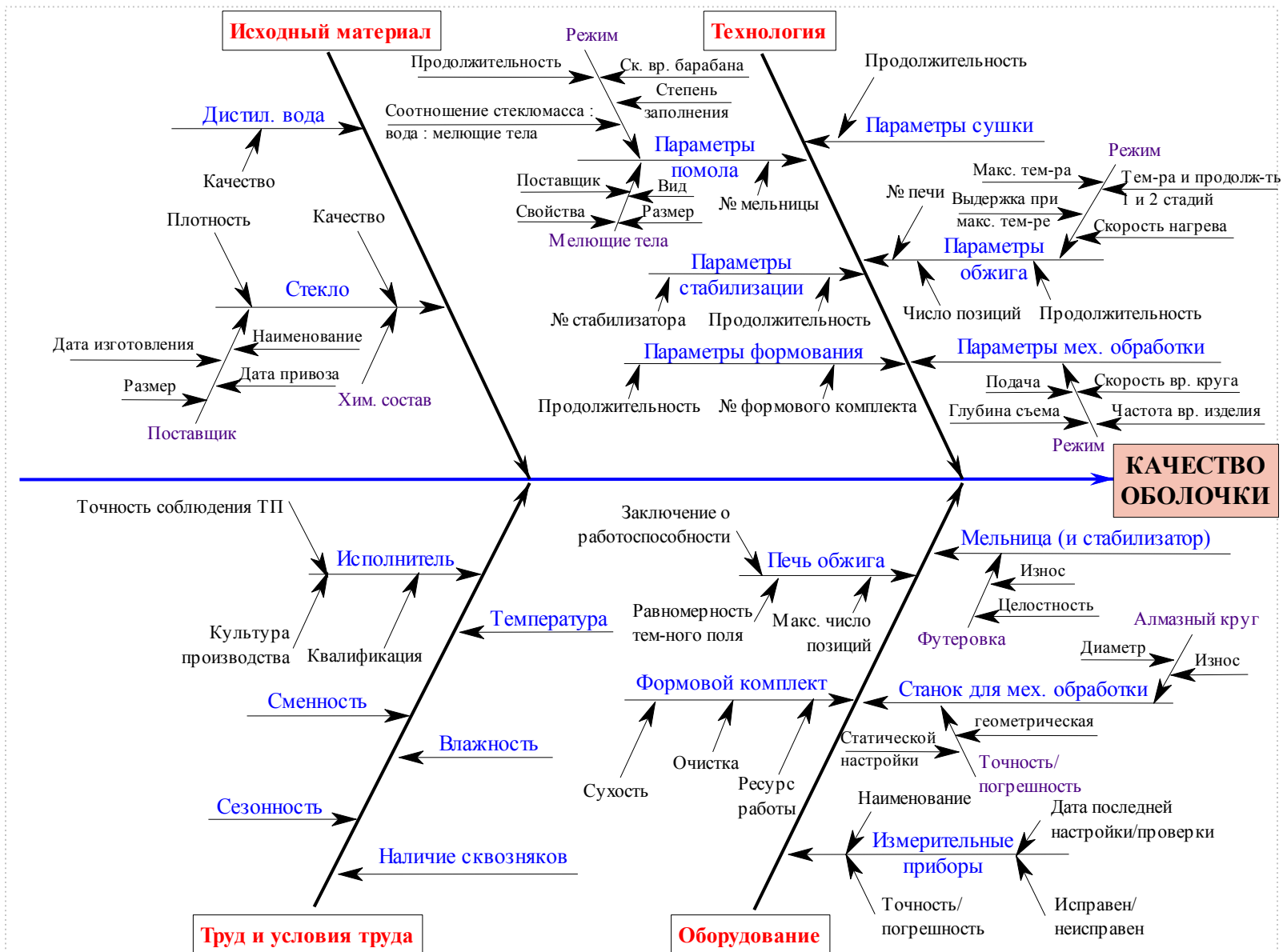


Рис. 3.1 Причинно-следственная диаграмма (диаграмма Исикавы) при анализе качества элементов ЛА

Как видно из диаграммы, качество готового изделия определяется не только факторами технологического характера, но также и нетехнологического, к которым можно отнести: состояние технологического оборудования, его износ, точность измерительных приборов, сезонность, сменность, человеческий фактор и многие другие. При этом при проведении статистического анализа технологических процессов следует всегда помнить, что строить различные регрессионные модели для прогнозирования выходных параметров изделия, а также улучшать процесс за счет технологических факторов можно лишь тогда, когда устранено влияние нетехнологических факторов.

Технологические процессы производства изделий из кварцевой керамики и стеклокерамики схожи – оболочки изготавливают по керамической технологии методом водного шликерного литья в гипсовые формы с последующим обжигом заготовок в электрических печах и механической обработкой [21]. Однако существует ряд отличительных особенностей.

Для изготовления оболочек из кварцевой керамики НИАСИТ в качестве исходного сырья используется прозрачное кварцевое стекло, поставляемое стекольными заводами в виде межразмерных труб или боя труб. В качестве исходного сырья для производства оболочек из стеклокерамики ОТМ-357 используют стекло ситалла АС 418; процесс получения стеклогранулята которого включает такие стадии, как: подготовка сырьевых материалов, сборка шихты, варка стекла, выработка стекломассы, контроль химического состава и свойств исходного стекла. Процесс подготовки сырья включает сушку, помол и просеивание сырьевых материалов с целью обеспечения однородности зернового состава шихты. Варка стекол осуществляется в газовых стекловаренных печах непрерывного действия типа ПСВ-6.

На стадии помола исходного сырья для производства оболочек из ОТМ-357 предварительно, в отличие от кварцевого стекла, осуществляется сухой помол подготовленного кускового стекла в течение 30-60 мин. и лишь после этого в мельницу добавляют дистиллированную воду. В процессе обжига

отформованной заготовки происходит спекание и кристаллизация в совмещенном режиме термообработки.

Еще одной отличительной особенностью рассматриваемых ТП является то, что оболочки из стеклокерамики, в отличие от кварцевых, не требуют нанесения лакокрасочных покрытий и пропитки кремнийорганическими соединениями, так как являются влагоустойчивыми.

За годы производства керамических элементов ЛА в ОАО «ОНПП «Технология» накоплена обширная база данных, позволяющая проследить пути совершенствования технологических процессов производства ряда изделий. Далее приведены результаты статистического анализа ТП серийного производства оболочек изделий из кварцевой керамики НИАСИТ – на примере изделия ОТИ 395 и стеклокерамики ОТМ-357 – на примере изделия ОТИ 742.

3.1.1. Статистический анализ технологического процесса производства изделий из кварцевой керамики

В [104] приведены данные статистического анализа ТП производства оболочек из кварцевой керамики за период 1985-1998гг. по 433 изделиям. Авторами работы сделан вывод о стабильности технологического процесса и свойств материала в течение всего срока производства (13 лет). В то же время, отмечая стабильность технологических параметров и свойств изделий, авторы [104] не упоминают о возможных случаях брака во взаимосвязи с объективными (технологическими) и субъективными (человеческий фактор) причинами. Поэтому представляет интерес статистический анализ ТП производства изделий из кварцевой керамики в настоящее время с учетом анализа брака на разных технологических стадиях.

Объем выборки при проведении данного исследования составил 306 оболочек¹⁶. В качестве технологических параметров были рассмотрены:

- партия стекла (дата) № партии;
- содержание примесей в исходном сырье

¹⁶ Данный материал опубликован в [107].

– плотность шликера	$\rho_{\text{шл}}$, кг/м ³ ;
– вязкость шликера	η , с;
– водородный показатель шликера	pH;
– влажность	w, %;
– содержание фракции до 5 мкм	T < 5 мкм, %;
– содержание фракции выше 63 мкм	T > 63 мкм, %;
– длительность стабилизации шликера	$\tau_{\text{стаб}}$, ч.;
– длительность набора заготовки	$\tau_{\text{наб}}$, ч.;
– номер формового комплекта	N _{фк} ;
– номер стабилизатора	N _{стаб} ;
– температура помещения в период формования	t _{пом} , °С;
– максимальная температура обжига	T _{обж} , °С;
– время обжига при максимальной температуре	$\tau_{\text{обж}}$, ч.;
– номер печи для обжига	N _{печи} .

В качестве основных свойств материала НИАСИТ были исследованы:

– линейная усадка по образующей	ЛУ _{обр} , %;
– линейная усадка по окружности	ЛУ _{окр} , %;
– открытая пористость	П, %;
– кажущаяся плотность	ρ , кг/м ³ ;
– относительная диэлектрическая проницаемость	ϵ ;
– предел прочности при изгибе (образцов и изделий)	$\sigma_{\text{из}}$, МПа;
– предел прочности клеевого соединения при сдвиге	$\tau_{\text{сдв}}$, МПа
– вид брака.	

Важным фактором, влияющим на свойства кварцевой керамики, является чистота исходного сырья и стерильность технологии производства на стадиях дробления стекла и приготовления шликера, т.к. практически все примеси являются активаторами кристаллизации материала. Примеси, особенно щелочных

металлов, даже при содержании основного вещества (SiO_2) более 99,98%, вызывают значительную неоднородность материала за счет кристаллизации его при обжиге, что приводит к ухудшению прочностных и других характеристик материала.

В табл. 3.1 приведены процентное содержание примесей в партиях исходного стекла (партии пронумерованы по мере их поступления в ОАО «ОНПП «Технология») и требования по ГОСТ. Общее количество примесей согласно технологическому паспорту на материал НИАСИТ не должно превышать 0,2%, что, как видно из табл. 3.1, выполняется.

Использование исходного сырья с незначительным превышением содержания примесей по сравнению с требованиями ТП, приводит к существенному уменьшению предела прочности материала и увеличению его разброса. На рис. 3.2 данный вывод проиллюстрирован на примере плотностей распределения пределов прочности при изгибе двух групп образцов материала НИАСИТ: 1 группа – образцы, вырезанные от заготовок с большим количеством кристаллита за счет наличия грязных мелющих тел при помоле; 2 группа – образцы от заготовок, полученных после замены мелющих тел. Уменьшение среднего предела прочности при изгибе материала составило порядка 23%, стандартное отклонение увеличилось с 8 до 12 МПа. Модули Вейбулла отличаются практически в два раза (5,3 и 10,7 соответственно).

Таблица 3.1 – Содержание примесей (%) в партиях исходного стекла

Химический элемент	по ГОСТ (не больше)	Партия исходного стекла							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Кол-во отформованных заготовок		58	53	52	38	36	26	38	5
Fe	0,04	0,00093	0,00075	0,00070	0,00800	0,00070	0,00250	0,00080	0,00060
Cu	0,001	0,00009	0,00007	0,00005	0,00009	0,00007	0,00020	0,00010	0,00007
Mn	0,001	0,00008	0,00006	0,00009	0,00010	0,00008	0,00009	0,00007	0,00006
Ti	0,02	0,00350	0,00180	0,00200	0,00400	0,00160	0,00150	0,00200	0,00030
Mg	0,002	0,00022	0,00030	0,00070	0,00050	0,00090	0,00010	0,00050	0,00050
Al	0,15	0,00140	0,00200	0,00200	0,00400	0,00140	0,00090	0,00095	0,00045
Ca	0,01	0,00085	0,00025	0,00090	0,00100	0,00450	0,00050	0,00075	0,00080
Na	0,07	0,00039	0,00050	0,00060	0,00100	0,00400	0,00060	0,00040	0,00100
K	0,04	0,00048	0,00007	0,00030	0,00010	0,00160	0,00030	0,00070	0,00050
Сумма примесей		0,00794	0,00580	0,00734	0,01879	0,01485	0,00669	0,00627	0,00428
Содержание щелочей (K, Na, Ca)		0,00172	0,00082	0,00180	0,00210	0,01010	0,0014	0,00185	0,00230

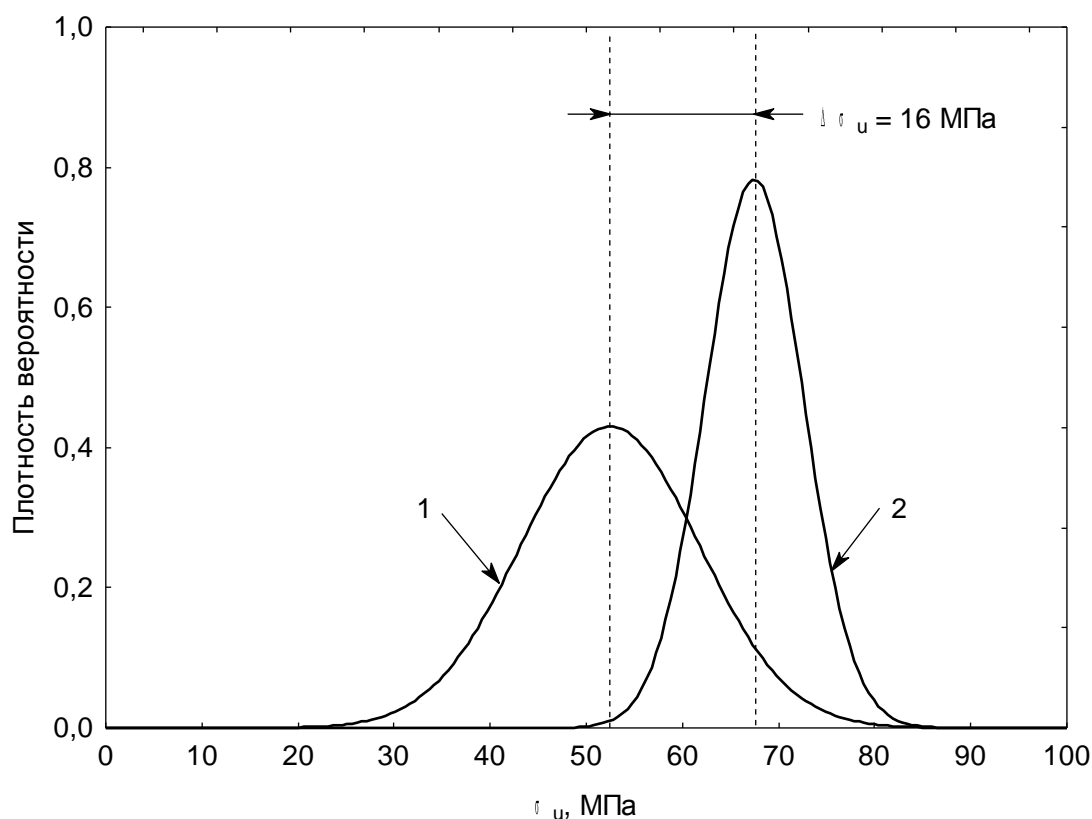


Рис. 3.2 Теоретические плотности распределения пределов прочности при изгибе двух групп образцов материала НИАСИТ: 1 – заготовки с большим количеством кристобалита за счет наличия грязных мелющих тел; 2 – заготовки, полученные после замены мелющих тел

В табл. 3.2-3.3 приведены статистические характеристики технологических параметров, измеренных в количественной и порядковой шкалах.

Значения η , pH , $T > 63$ мкм, $\tau_{наб}$, $t_{пом}$ не противоречат нормальному закону распределения (уровни значимости по критерию Колмогорова-Смирнова с поправкой Лиллиефорса $p > 0,50 \dots 0,70$), законы распределения остальных параметров ($\rho_{шл}$, w , $T < 5$ мкм, $\tau_{стаб}$) не являются нормальными, что объясняется их физической природой. Графически это проиллюстрировано на рис. Б.1-Б.9 (Приложение Б) в виде соответствующих эмпирических и теоретических функций плотностей распределения.

Учитывая специфику керамической технологии изготовления изделий, основные технологические параметры всегда выражаются некоторыми определенными интервалами значений, являющимися компромиссом между техноло-

гическими возможностями и качеством. При этом технологические параметры не ограничиваются жестко выраженными постоянными величинами.

Таблица 3.2 – Статистические характеристики исследуемых количественных технологических параметров

Хар-ка	Среднее значение	Станд. откл.	Коэф. вариации, %	Min	Max
η , с	30,16	3,54	11,7	17,00	39,00
pH	4,8	0,3	6,9	4,2	6,0
T < 5 мкм, %	21,84	1,14	5,2	20,34	24,70
T > 63 мкм, %	5,97	0,53	8,9	4,00	7,50
$\tau_{\text{стаб}}$, ч	172,0	80,0	46,5	45,5	750,0
$\tau_{\text{наб}}$, ч	7,1	1,1	15,5	5,0	1,8
$t_{\text{пом}}$, °C	28,05	3,87	13,8	17,00	37,00
$\tau_{\text{обж}}$, ч	2,65	0,37	14,0	2,00	3,00

Таблица 3.3 – Таблица частот исследуемых порядковых технологических параметров

Хар-ка	Значение	Частота	Накопленная частота	Процент, %	Накопленный процент, %
$\rho_{\text{шл}}$, кг/м ³	1870	100	100	32,68	32,68
	1880	204	304	66,67	99,35
	1890	2	306	0,65	100,00
w, %	13,5	3	3	0,98	0,98
	14,1	203	206	66,34	67,32
	14,5	100	306	32,68	100,00
N _{фк}	3	50	50	16,34	16,34
	4	38	88	12,41	28,75
	5	10	98	3,27	32,02

Хар-ка	Значение	Частота	Накоп- ленная частота	Процент, %	Накоп- ленный процент, %
N _{стаб}	2	1	1	0,33	0,33
	3	89	90	29,08	29,41
	4	7	97	2,29	31,70
	5	1	98	0,33	32,03
N _{печи}	1	255	255	83,33	83,33
	2	10	265	3,27	86,60
	5	1	266	0,33	86,93
T _{обж} , °C	1240	16	16	5,23	5,23
	1250	72	88	23,53	28,76
	1255	84	172	27,45	56,21
	1260	82	254	26,80	83,01
	1265	1	255	0,33	83,33

Диапазоны изменения регламентируемых технологических факторов исследуемых изделий ОТИ 742 находятся в установленных допусках (табл. 3.4), что свидетельствует о стабильности ТП.

Каких-либо серьезных аномалий в тенденциях изменения реологических свойств шликеров, получаемых из кварцевого стекла, и в распределении их зернового состава по фракциям выявлено не было. Однако по абсолютному значению рН шликеров сдвигается в область более низких значений со средним значением 4,8, в то время как в предыдущие годы (использование отходов производства, содержащих большое количество щелочных элементов) рН в основном составлял 5,0...6,0.

Следует отметить, что если в процессе приготовления шликера кварцевого стекла основные технологические операции строго контролируемые, то процесс формования сопровождается влиянием большого количества субъективных факторов, и несоблюдение требований к технологической оснастке,

аналогично, как и игнорирование других требований (субъективный фактор) являются, как правило, причинами выхода заготовок в брак при формовании.

Таблица 3.4 – Контрольные допуски на технологические параметры материала НИАСИТ по ТП и паспорту на материал

Характеристика	Нижняя граница	Верхняя граница	Примечание
$\rho_{\text{шл}},$ кг/м ³	1870	1890	достигается соблюдением пропорции загружаемых на помол материалов или смешиванием шликеров различных помолов
$\eta,$ с	20,0	–	достигается длительностью стабилизации шликера, скоростью вращения стабилизатора
pH	4	6	достигается непосредственно в процессе помола стекла. Связано с химическим составом исходного стекла, тониной помола ($T > 63$ мкм), скоростью вращения мельницы и длительностью стабилизации
$T < 5$ мкм, %	20,0	30,0	достигается соблюдением пропорций материалов, размерности мелющих тел и длительностью помола
$T > 63$ мкм, %	4,0	7,6	– // –

Наличие большого количества объективных и субъективных факторов, безусловно, способно дестабилизировать ТП получения заготовок. Однако, как показывают результаты статистического анализа длительности формования заготовок в зависимости от времени года (рис. 3.3), процесс формования является достаточно устойчивым с коэффициентом вариации $\tau_{\text{наб}}$ равным 15,5%. При этом формование происходит быстрее в формовом комплекте $N_{\text{фк}} = 3$ (рис. 3.4): дисперсионный анализ показал значимость различий ($p < 0,05$) в средних значениях $\tau_{\text{наб}}$ заготовок, отформованных в $N_{\text{фк}} = 3, 4$ и 5.

На ранних стадиях анализа технологии было выявлено влияние температуры в помещении на участках формовки на время набора заготовок: при низких температурах время набора увеличивалось. В целях устранения этого влияния было введено экранирование участков и постоянный контроль температуры.

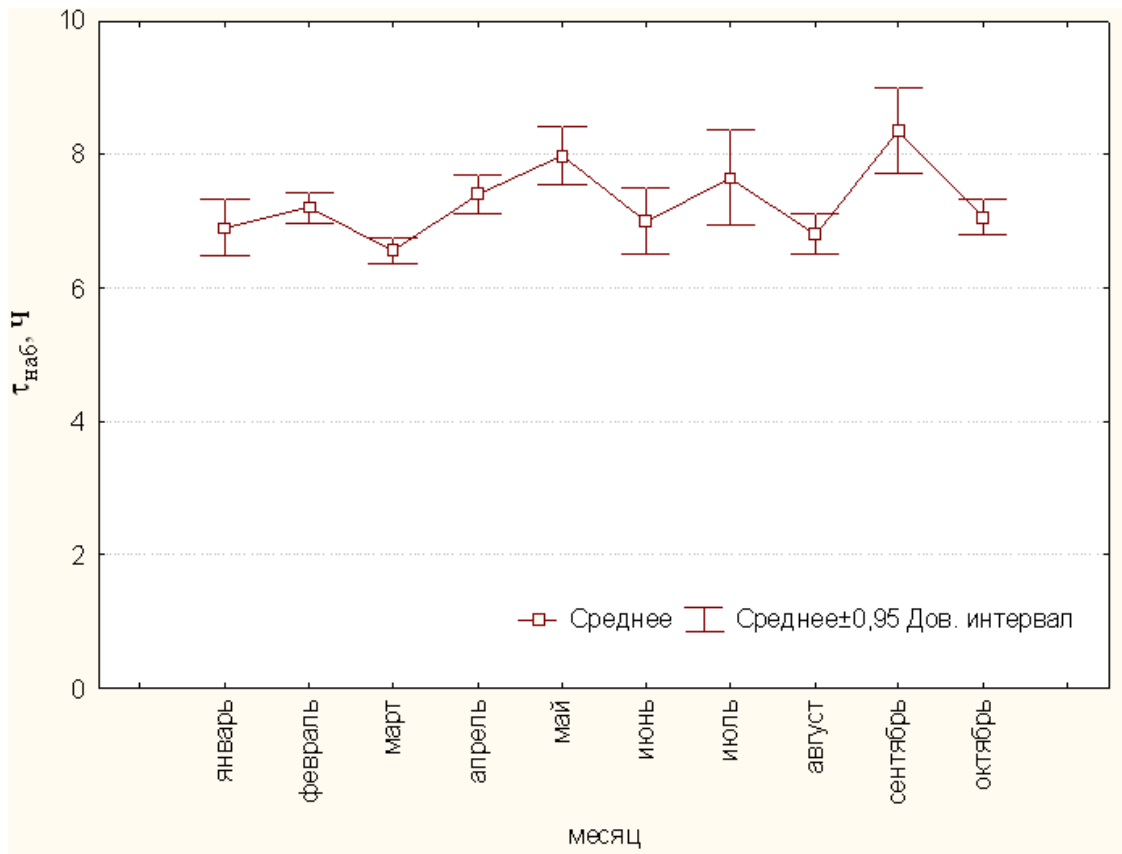


Рис. 3.3 Зависимость длительности набора от месяца формирования

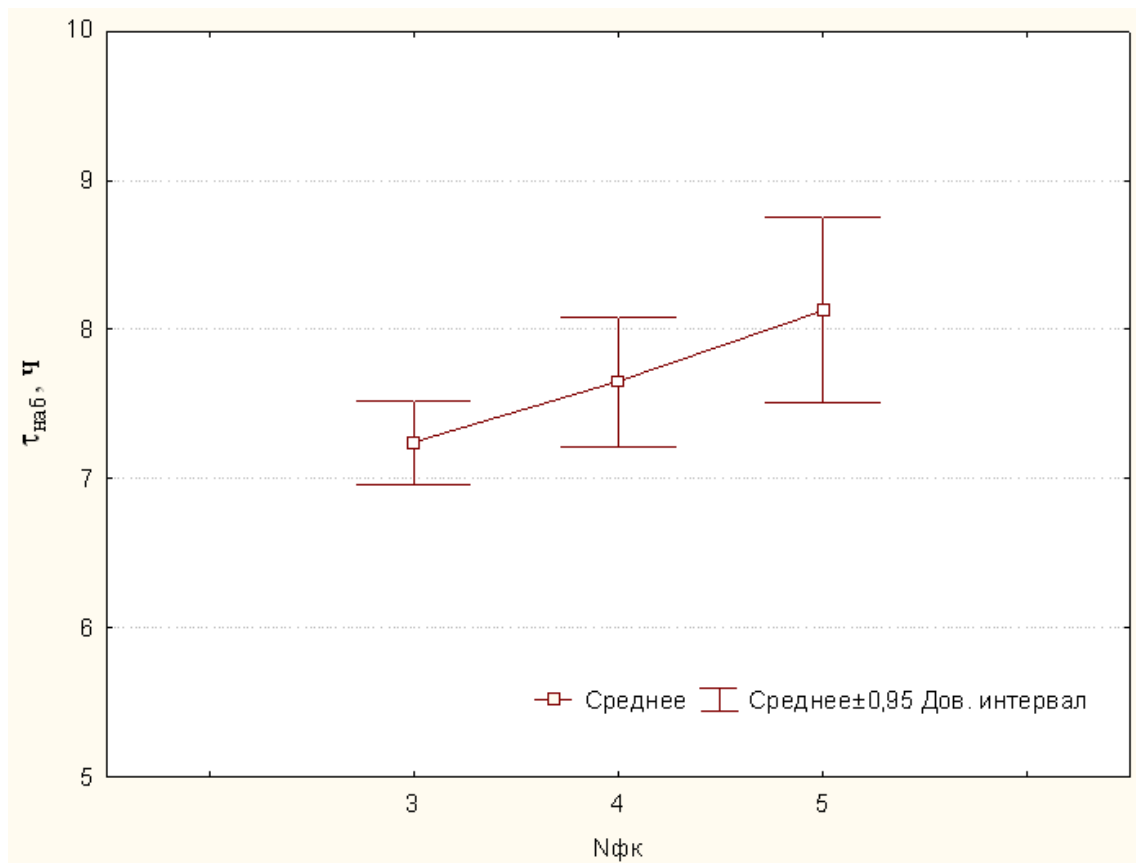


Рис. 3.4 Зависимость длительности набора от номера формового комплекта

Взаимосвязь $T_{обж}$ и $\tau_{обж}$ представлена в виде диаграммы рассеяния на рис. 3.5, из которого следует, что наблюдается некоторая тенденция к увеличению времени обжига при более повышенной температуре.

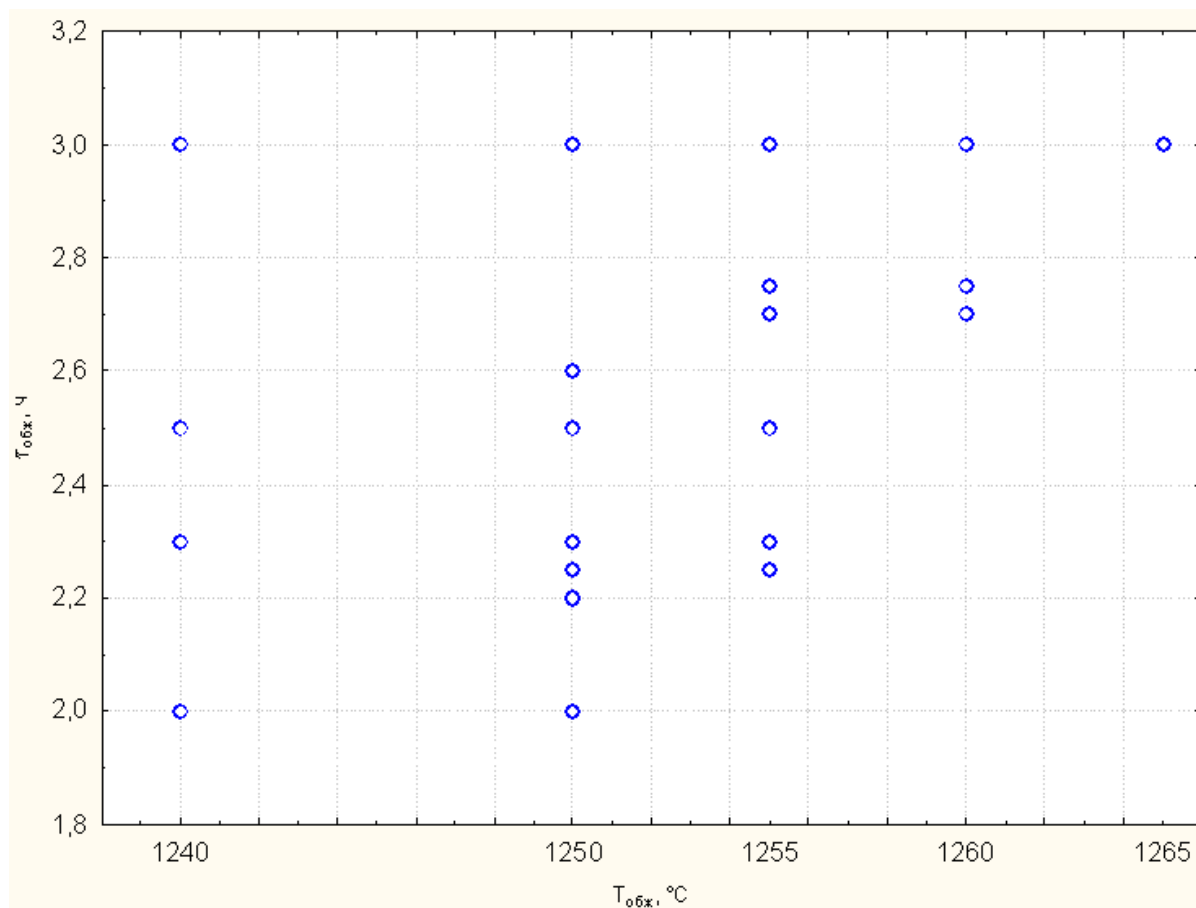


Рис. 3.5 Взаимосвязь времени обжига и максимальной температуры обжига

Статистические параметры основных исследуемых свойств материала НИАСИТ приведены в табл. 3.5, их распределения – на рис. Б.10-Б.15. Распределения данных свойств демонстрируют нормальный закон распределения на протяжении всего периода существования ТП производства изделий из кварцевой керамики, в том числе и на сегодняшний момент (уровень значимости критерия согласия Колмогорова-Смирнова с поправкой Лиллиефорса $p > 0,60$).

Значения ρ , ε , σ_u изменяются в узких диапазонах, соответствующих установленным по ТУ допускам (табл. 3.6), и имеют небольшие коэффициенты вариации. Вариации значений линейной усадки и $\tau_{сдв}$ несколько выше, а процент выпадающих за нижнюю границу значений $\tau_{сдв}$ составляет не более 1,5%.

Таблица 3.5 – Статистические параметры исследуемых основных исследуемых свойств материала НИАСИТ

Хар-ка	Среднее значение	Станд. откл.	Коэф. вариации, %	Min	Max
ЛУ _{обр} , %	1,42	0,23	16,2	0,47	1,90
ЛУ _{окр} , %	1,29	0,20	15,5	0,70	1,81
ρ , кг/м ³	1986	10	0,5	1955	2016
ε	3,400	0,026	0,8	3,325	3,465
σ_u , МПа	72,1	4,46	6,2	54,6	83,0
$\tau_{сдв}$, МПа	3,15	0,41	13,0	2,23	4,15

Таблица 3.6 – Контрольные допуски на основные свойства материала НИАСИТ по ТП и паспорту на материал

Характеристика	Нижняя граница	Верхняя граница
ρ , кг/м ³	1940	2050
ε	3,30	3,53
σ_u , МПа	39,2	–
$\tau_{сдв}$, МПа	2,35	–

Наличие в серийном производстве устойчивых взаимосвязей между плотностью и пределом прочности, между плотностью и диэлектрической проницаемостью материала в изделиях, которые были замечены и установлены еще 20-25 лет назад, подтверждают стабильность технологии производства и качества изделий на сегодняшнем этапе. На рис. 3.6 приведены зависимости среднего предела прочности и кажущейся плотности, на рис. 3.7 – плотности и диэлектрической проницаемости. Коэффициенты корреляции равны соответственно 0,40 и 0,84 и находятся на значимом уровне ($p < 0,05$).

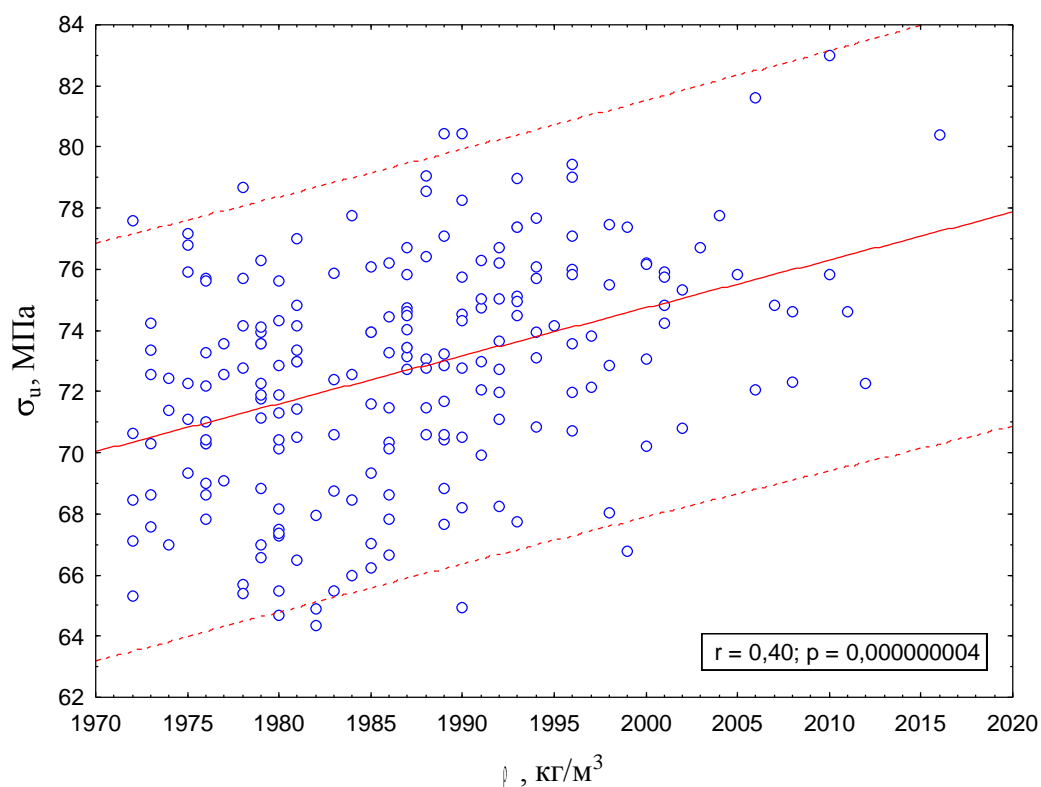


Рис. 3.6 Взаимосвязь среднего предела прочности при изгибе и кажущейся плотности

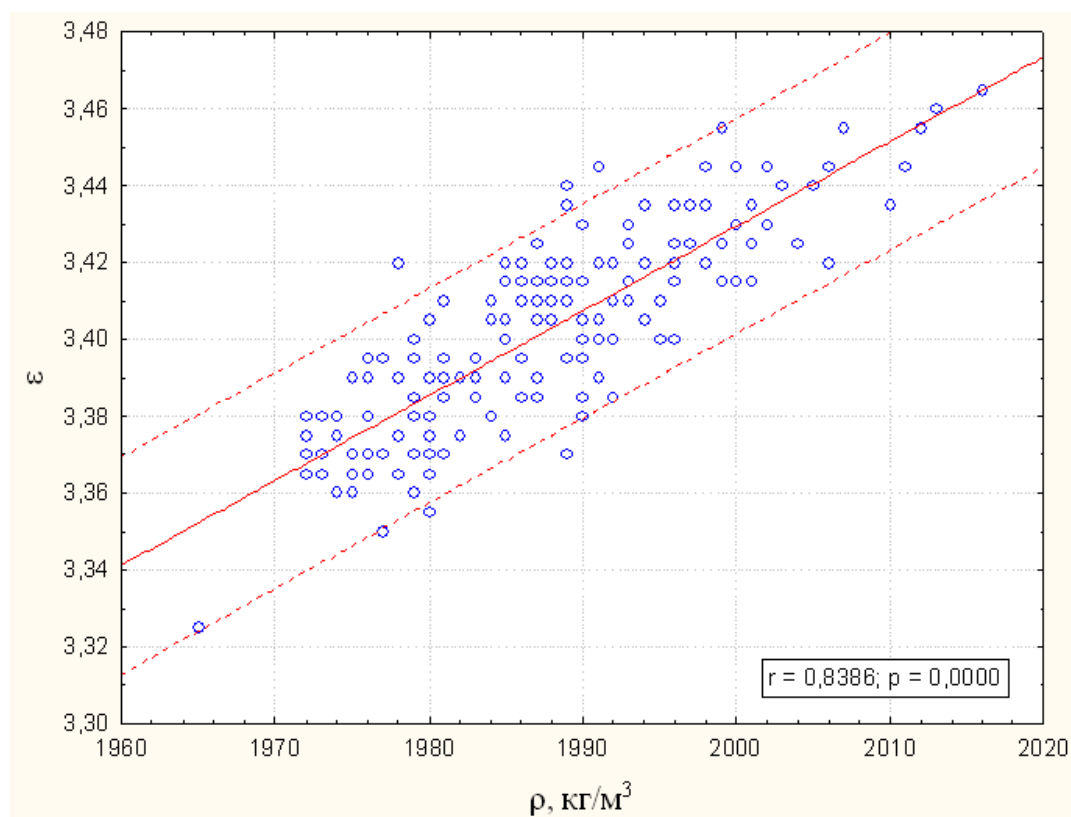


Рис. 3.7 Взаимосвязь кажущейся плотности и диэлектрической проницаемости

Однако наличие примесей приводит к потере корреляционной взаимосвязи между плотностью и пределом прочности (рис. 3.8).

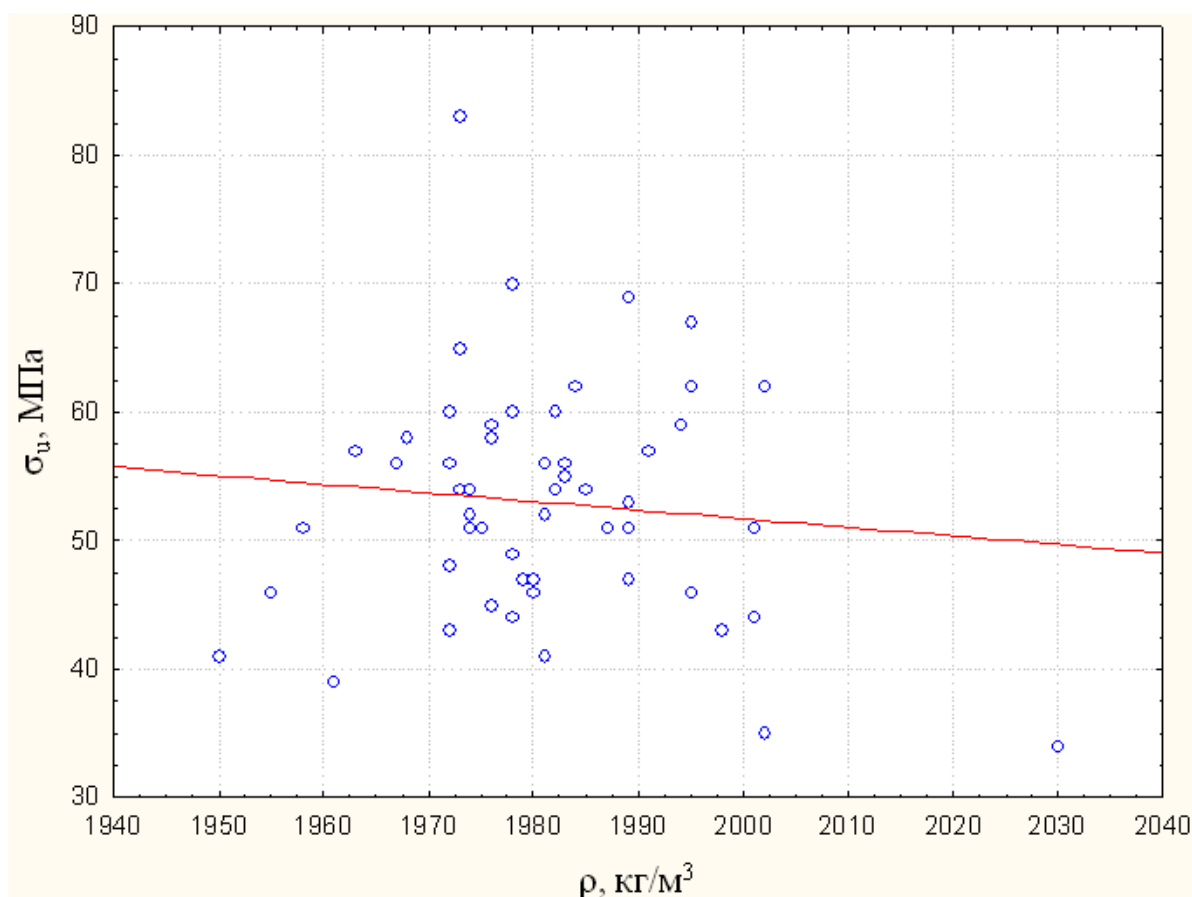


Рис. 3.8 Взаимосвязь среднего предела прочности при изгибе и кажущейся плотности для заготовок с большим количеством кристобалита

Наиболее важным и энергоемким во всей технологической цепи получения изделий из кварцевой керамики является процесс обжига заготовок. На рис. 3.9 показано влияние температуры обжига на основные свойства кварцевой керамики. Зависимость приведена для длительности нагрева 2 часа. Пунктиром показан оптимизированный для данного вида изделия допустимый диапазон температур при времени выдержки 1-3 часа.

Из рисунка видно, что при увеличении температуры (в данном диапазоне) практически линейно возрастает предел прочности, диэлектрическая проницаемость, модуль упругости и уменьшаются пористость и работа разрушения. Скорость нагрева и охлаждения при проведении режимов термообработки изделий из кварцевой керамики не оказывает принципиального значения на уровень свойств материала и регламентируются лишь возможностями технологического оборудования и техникой безопасности обслуживающего персонала.

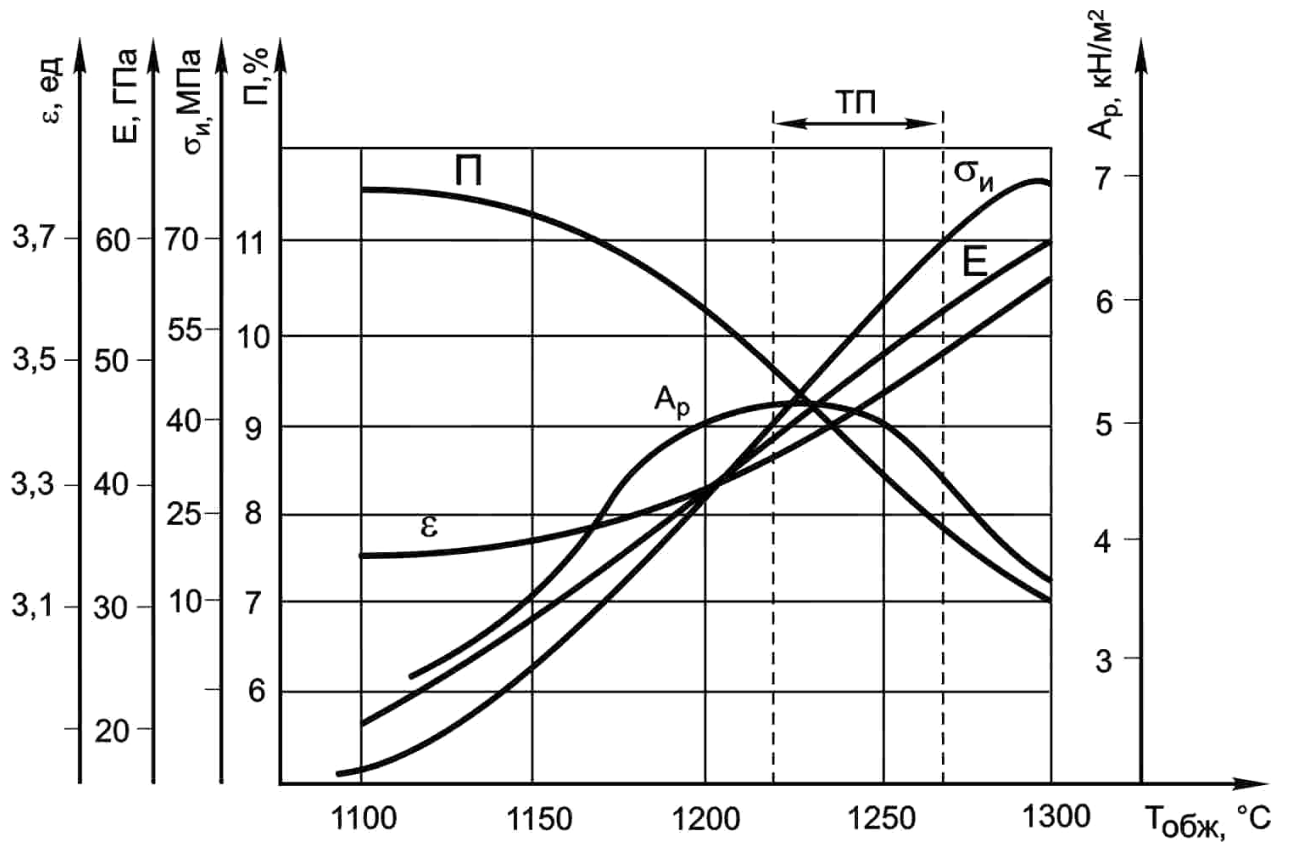


Рис. 3.9 Зависимость основных свойств кварцевой керамики от температуры обжига

Особое внимание в технологии шликерного литья заготовок уделяется равномерности свойств по их объему. В этом случае в заготовке проявляется вся предыстория ее получения. Характер распределения плотности по длине заготовки представлен на рис. 3.10. Обычно плотность материала увеличивается от основания к вершине отформованных заготовок, а пористость в том же направлении, соответственно, снижается. Однако эта неравномерность незначительна по абсолютной величине и находится в пределах погрешностей измерений указанных величин (15 кг/м³ и 1 % соответственно).

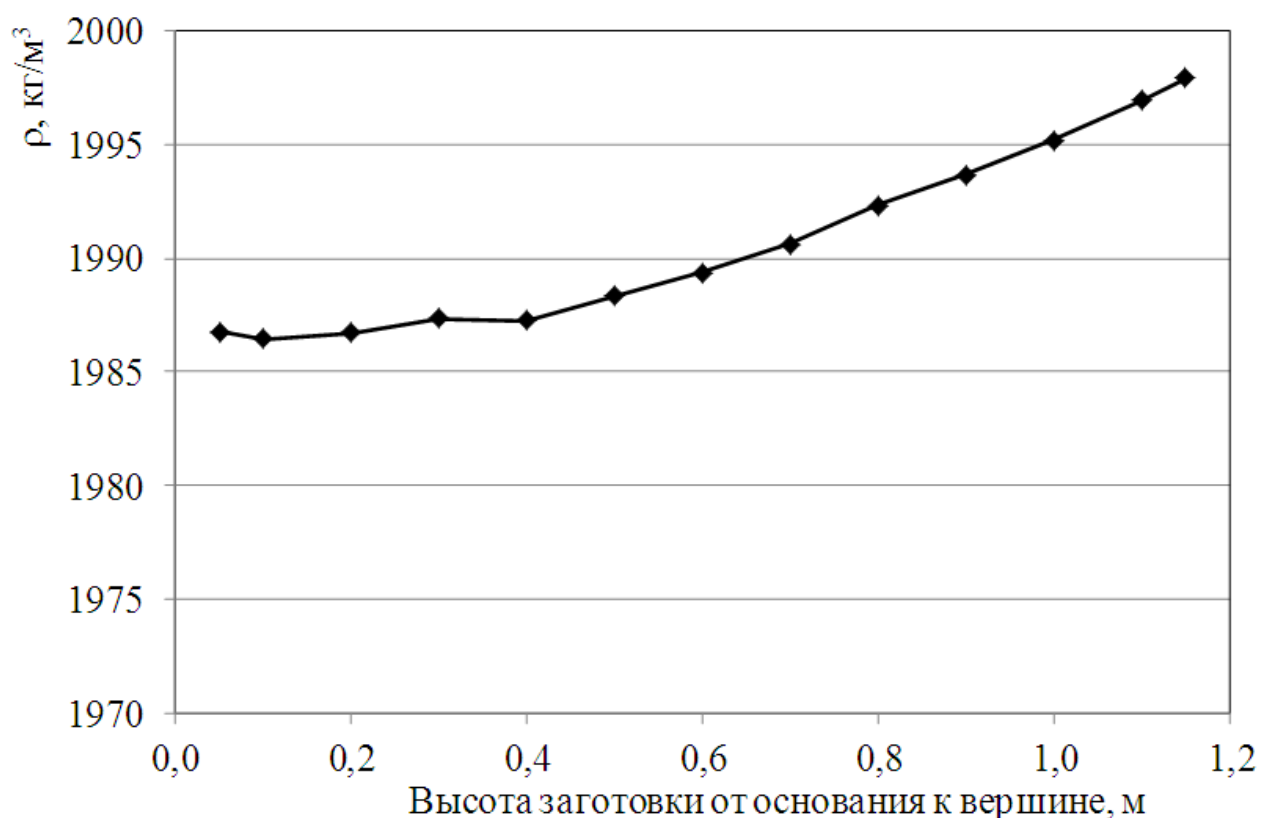


Рис. 3.10 Изменение среднего значения плотности по длине изделия

Состояние большинства технологических операций процесса производства изделий из кварцевой керамики является контролируемым и достаточно стабильным, что позволяет управлять данным процессом и реализовывать заданный уровень физико-технических свойств изделий.

В то же время, как и любое производство, изготовление крупногабаритных, сложных по форме изделий из кварцевой керамики связано с наличием брака. Анализ соотношения числа годных и забракованных изделий, приведенный на рис. 3.11 в виде диаграммы Парето, показывает, что при наличии 70% годных изделий, количество забракованных (92 шт.) распределилось по видам брака следующим образом: 11,5% – брак на стадии формования, 9,5% – брак на стадии обжига, 9,2% – другие виды брака.

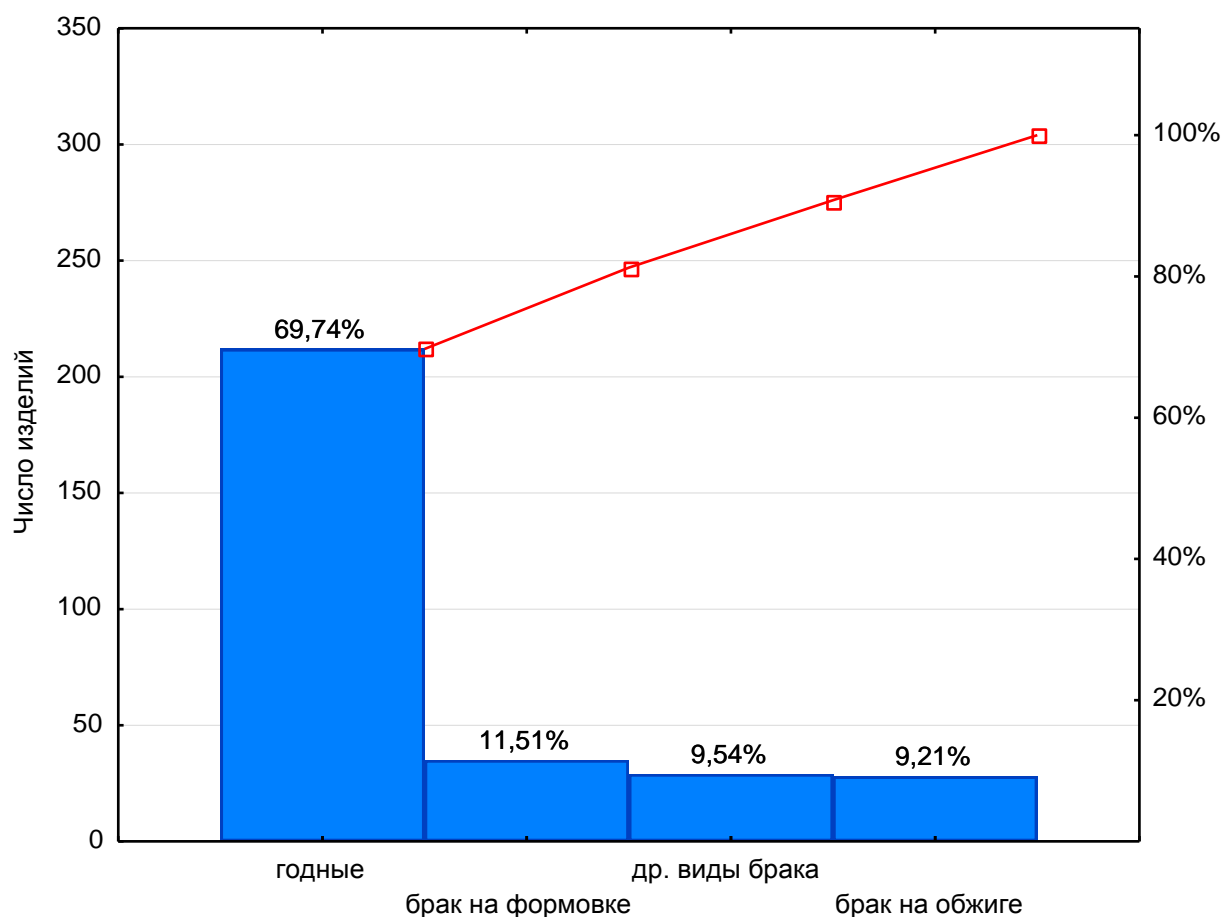


Рис. 3.11 Соотношение числа бракованных изделий по этапам ТП

В табл. 3.7 представлены данные по количеству годных и бракованных изделий, выпущенных в рамках каждой партии исходного стекла, а на рис. 3.12 – зависимость брака при формовке и обжиге от условного номера этой партии. Оценка взаимосвязи партии стекла с видами брака по критерию χ^2 оказалась незначимой ($p > 0,05$).

Регрессионный анализ взаимосвязи технологических параметров шликеров, условий формования и свойств обожженных заготовок с качеством полученных изделий позволяет заключить, что флуктуации ряда свойств (вязкости, длительности стабилизации, рН шликера, длительности формования заготовок, плотности обожженных изделий) адекватно не влекут за собой существенных изменений качества готовых изделий.

Можно лишь отметить, что при больших временах набора (> 9 ч.) один раз встречается брак при формовке, и заготовки при этом имеют меньшие значения

линейной усадки. Однако все остальные параметры шликера остались на уровне незначимости.

Таблица 3.7 – Количество годных изделий и брака по партиям исходного стекла

Условный номер партии	Годные		Брак при формовке		Брак при обжиге		Другие виды брака		Всего
	шт	%	шт	%	шт	%	шт	%	
1	29	50,0	10	17,2	8	13,8	11	19,0	58
2	36	67,9	9	17,0	3	5,7	5	9,4	53
3	40	76,9	3	5,8	3	5,7	6	11,5	52
4	29	76,3	2	5,3	6	15,8	1	2,6	38
5	22	61,1	6	16,7	2	5,6	6	16,7	36
6	24	92,3	0	0,0	2	7,7	0	0,0	26
7	29	78,4	4	10,8	4	10,8	0	0,0	37
8	3	75,0	1	25,0	0	0,0	0	0,0	4
Всего:	212	69,7	35	11,5	28	9,2	29	9,5	304

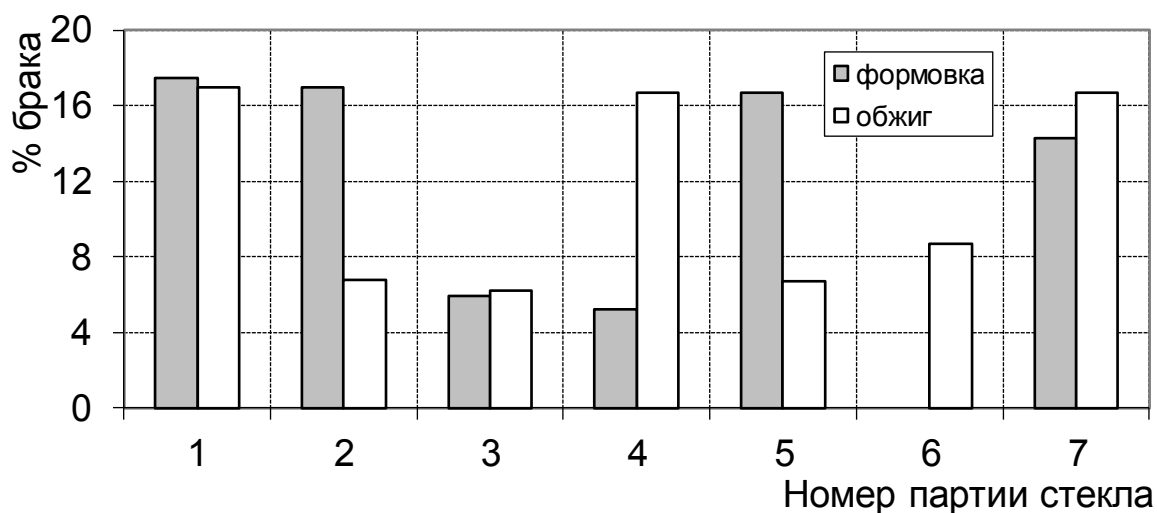


Рис. 3.12 Процент брака при формовке и обжиге в каждой партии исходного стекла

Таким образом, проведенный статистический анализ ТП производства изделия ОТИ 395 показал, что ТП в настоящее время является стабильным и управляемым. Достаточная узость выбранных допусков на технологические па-

раметры и важность их соблюдения позволяет изготавливать изделия заданного качества, определяемого основными свойствами материала оболочки.

3.1.2. Статистический анализ технологического процесса производства изделий из стеклокерамики

В качестве контролируемых технологических параметров и основных свойств материала ОТМ-357 при исследовании стабильности ТП производства изделия ОТИ 742 были рассмотрены, в основном, те же параметры и свойства, что и для материала НИАСИТ (см. п. 3.1.1).

Контрольные допуски на технологические параметры и характеристики материала приведены в табл. 3.8.

Таблица 3.8 – Контрольные допуски на технологические параметры и характеристики материала ОТМ 357 по ТП и паспорту на материал

Характеристика	Нижняя граница	Верхняя граница
$\rho_{\text{шл}}$, кг/м ³	1990	2040 (допускается 2050)
η , с	30 (допускается 35)	85
pH	7,5 (допускается 8,0)	9,0 (допускается 10,0)
T < 5 мкм, %	20,0	30,0
T > 63 мкм, %	9,0 (допускается 5,0)	13,5
Линейная усадка	не нормируется	не нормируется
ρ , кг/м ³	2430	2550
ε	6,8	7,5
$\text{tg}\delta \cdot 10^4$	–	130
σ_u , МПа	108	–

Были исследованы параметры ТП производства оболочек, изготовленных из гранулята стекла ОТМ 553, приготовленного в течение одного года. Общее количество оболочек изделия ОТИ 742 в анализируемой выборке составило 453 шт.

Температурно-временные параметры обжига для данного изделия не рассматривали, т.к. температура при первом подъеме и выдержке в течение 5 часов во всех случаях составляла $650 \pm 20^\circ\text{C}$, максимальную температуру задавали в пределах $(1230 \div 1250) \pm 10^\circ\text{C}$ в большинстве случаев при постоянном времени выдержки – 7 часов. Также не рассматривали влияние № печи, т.к. подавляющее большинство заготовок обжигали в печи № 3.

Характер распределений значений исследуемых параметров ТП представлен на рис. Б.17-Б.23, свойств материала ОТМ-357 – на рис. Б.24-Б.29, статистические характеристики этих распределений – в табл. 3.9.

На рисунках приведены распределения для заготовок, отформованных в различных формовочных комплектах с номерами 3-8, 10-12, которые, как показывает анализ, не сказываются на качестве готового изделия (значимая взаимосвязь $N_{\text{фк}}$ с основными свойствами оболочек по дисперсионному анализу Краскелла-Уолисса отсутствует, $p > 0,05$).

Из представленных на рис. Б.17-Б.29 результатов следует, что распределения исследуемых параметров не противоречат нормальному закону (уровень значимости по критерию Колмогорова-Смирнова с поправкой Лиллиефорса $p > 0,60 \dots 0,90$) за исключением таких характеристик, как плотность, рН и влажность шликера, процентное содержание фракции < 5 мкм, распределения которых не носят полностью случайного характера. Наблюдаемые значения всех рассматриваемых параметров исследованных заготовок (оболочек) лежат в пределах контролируемых допусков (см. табл. 3.9):

- минимальное значение предела прочности при статическом изгибе составляет 119 МПа;
- кажущаяся плотность изменяется в интервале от 2476 до 2515 кг/м³;
- относительная диэлектрическая проницаемость от 6,99 до 7,22;
- максимальное значение $\text{tg } \delta$ составляет 123, при этом лишь для 3-х оболочек из 322 наблюдается превышение уровня 120 (120,5; 122 и 123), т.е. вероятность превышения уровня 120 исходя из нормального закона распределения $\text{tg } \delta$ составляет 0,5%.

Таблица 3.9 – Статистические характеристики исследуемых параметров

Хар-ка	Среднее значение	Станд. откл.	Коэф. вариации, %	Min	Max
$\rho_{\text{шл}}$, кг/м ³	2006	6	0,3	1990	2040
η , с	62,83	5,58	8,9	46,00	76,00
pH	7,52	0,09	1,2	7,40	8,30
w, %	15,81	0,020	0,1	15,10	16,10
T < 5 мкм, %	21,57	1,02	4,7	20,00	25,27
T > 63 мкм, %	7,12	0,70	9,8	5,10	9,00
ЛУ _{обр} , %	5,88	0,21	3,6	5,02	6,50
ЛУ _{окр} , %	5,53	0,16	2,9	5,00	6,40
ρ , кг/м ³	2499	7	0,3	2476	2515
ε	7,10	0,04	0,6	6,99	7,22
$\text{tg}\delta \cdot 10^4$	110,8	3,8	3,4	102	123
$\sigma_{\text{ц}}$, МПа	133,5	7,1	5,3	116,9	153,4

Из представленных в табл. 3.9 данных следует, что значения плотности шликера, плотности материала и диэлектрической проницаемости изменяются в достаточно узком диапазоне, коэффициенты вариации составляют 0,3; 0,3 и 0,6% соответственно. В то же время для $\text{tg}\delta$ и $\sigma_{\text{ц}}$ коэффициенты вариации равны 3,4 и 5,3% соответственно, что существенно выше, чем для ε .

Для содержания фракции > 63% коэффициенты вариации составляют 9,8%, для содержания фракции до 5% – 4,7%, для η и pH – 8,9 и 1,2% соответственно, для линейной усадки по окружности и по образующей – 3,6 и 2,9%.

Таким образом, проведенный статистический анализ распределений исследуемых характеристик оболочек показал, что все рассмотренные характеристики соответствуют требованиям ТП и ТУ, и с этой точки зрения процесс изготовления изделий ОТИ 742 является воспроизводимым, как и в предыдущие годы исследования [108].

Дополнительно к параметрам ТП было рассмотрено изменение значений контролируемых показателей (химического состава) гранулята стекла ОТМ-553 для партий, изготовленных и сформированных в исследуемый период. В табл. 3.10 приведены статистические характеристики контролируемых показателей гранулята и их значения по ГОСТ, из которой видно, что все контролируемые показатели находятся в пределах заданных допусков.

Таблица 3.10 – Статистические характеристики контролируемых параметров гранулята стекла ОТМ-553

Хар-ка	Среднее значение	Станд. откл.	Коэф. вариации, %	Min	Max	Значение по ГОСТ
SiO ₂ , %	63,613	0,281	0,441	63,200	64,000	62,5-65,5
Al ₂ O ₃ , %	25,052	0,189	0,755	24,700	25,500	24,0-26,0
Li ₂ O, %	3,737	0,107	2,875	3,600	3,900	3,6-6,9
TiO ₂ , %	5,113	0,187	3,654	4,700	5,500	4,3-5,5
BaO, %	1,000	0,000	0,000	1,000	1,000	0,9-1,1
ZnO, %	0,907	0,025	2,752	0,900	1,000	0,8-1,0
Sb ₂ O ₃ , %	0,428	0,035	8,099	0,400	0,500	0,0-0,6

На рис. 3.13 показан порядок использования партий гранулята стекла ОТМ-553 по дате формования заготовок. Поскольку между датой формования и датой обжига, с одной стороны, и партиями гранулята стекла, с другой, наблюдается линейная зависимость, то изменение значений исследуемых характеристик от даты формования будет аналогично изменению от даты обжига.

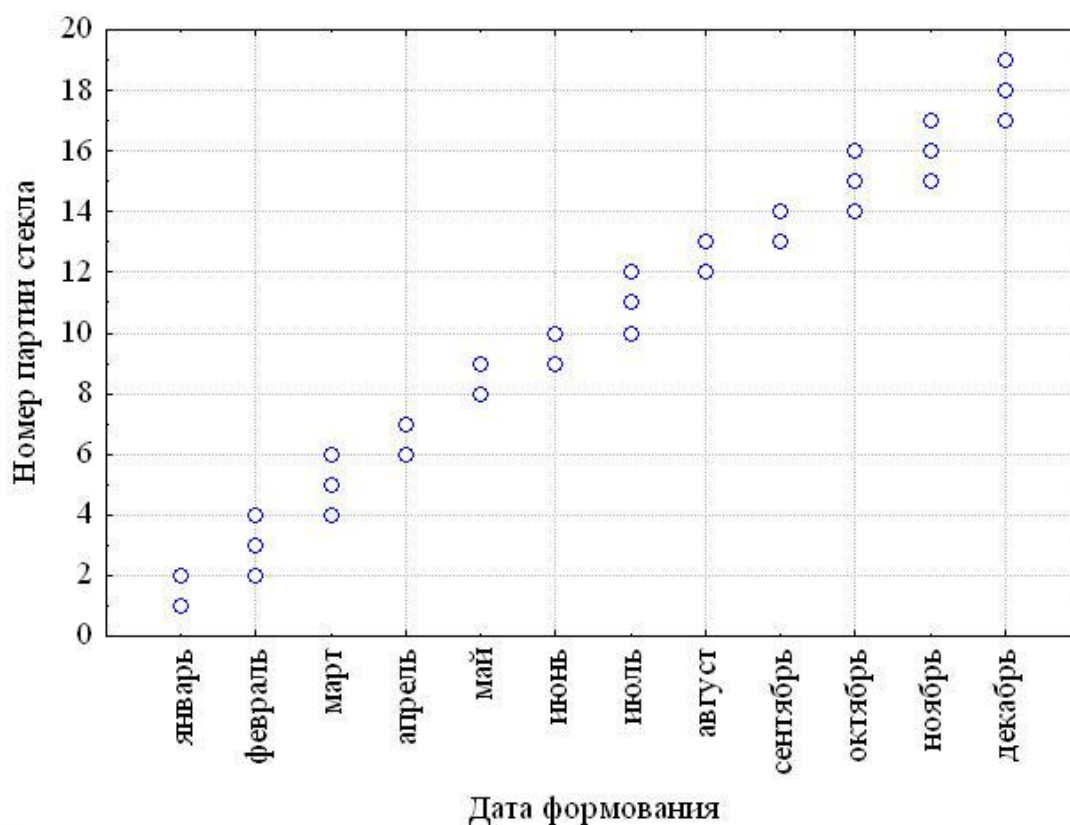


Рис. 3.13 Использование партий гранулята стекла¹⁷ по дате формирования

Одним из статистических методов анализа состояния технологического процесса являются, как уже упоминалось ранее, методы корреляционного и регрессионного анализа, позволяющие делать выводы о степени и форме зависимости (взаимосвязи) между исследуемыми параметрами.

В табл. 3.11 и 3.12 приведены матрицы парных корреляций между содержанием химических компонентов гранулята стекла и основными свойствами материала оболочек, а также между технологическими параметрами процесса изготовления оболочек и свойствами материала соответственно (значимые на уровне $p < 0,05$ связи отмечены жирным шрифтом).

¹⁷ Партии гранулята стекла условно обозначены цифрами 1...20 в хронологическом порядке поступления гранулята и варки стекла.

Таблица 3.11 – Коэффициенты парной корреляции между содержанием химических компонентов гранулята стекла и основными свойствами материала оболочек ОТИ 742 (число оболочек = 271¹⁸)

Параметры	ρ	ε	$\text{tg}\delta \cdot 10^4$	σ_u
SiO ₂	0,10	-0,29	0,08	-0,04
Al ₂ O ₃	-0,01	0,17	-0,08	0,05
Li ₂ O	-0,07	-0,02	0,15	-0,06
TiO ₂	0,06	0,29	-0,27	-0,05
Sb ₂ O ₃	-0,08	-0,17	0,15	0,04

Таблица 3.12 – Коэффициенты парной корреляции между технологическими параметрами и основными свойствами материала оболочек (число оболочек = 231¹⁸)

Параметры	ρ	ε	$\text{tg}\delta \cdot 10^4$	σ_u
η	-0,25	-0,24	-0,06	-0,14
T > 63 мкм	-0,15	-0,04	-0,27	-0,07
T < 5 мкм	0,10	0,08	-0,06	-0,05
$\tau_{\text{наб}}$	0,16	0,08	0,16	0,17

В табл. 3.11 не включены: ВаО – содержание 1%, ZnO – содержание в подавляющем большинстве 0,9% . В табл. 3.12 не включены параметры $\rho_{\text{шл}}$ и рН, т.к. их значения разделяются по оболочкам практически на 2 группы: 2000 кг/м³ (200 шт.) и 2010 кг/м³ (240 шт.) для $\rho_{\text{шл}}$ и 7,5 (380 шт.) и 7,6 (60 шт.) для рН.

Как следует из представленных в табл. 3.11 результатов, для σ и ρ связи с компонентным составом гранулята стекла незначимы, а значимые связи для ε , и $\text{tg } \delta$ в основном свидетельствуют лишь о некоторой тенденции.

¹⁸ Уменьшение объема выборок в табл. 3.11 и 3.12 по сравнению с проанализированным количеством заготовок ($n = 453$) произошло из-за построчного удаления пропущенных данных. Пропуски в строках исходной таблицы возникли из-за наличия брака в основном на стадиях формовки и обжига и отсутствия информации по некоторым параметрам.

На рис. 3.14 в качестве иллюстрации приведены диаграммы рассеяния для ε и $\operatorname{tg} \delta$ в зависимости от содержания TiO_2 . Несмотря на большой разброс данных и, следовательно, на невысокие значения коэффициентов корреляции, эти связи статистически значимы.

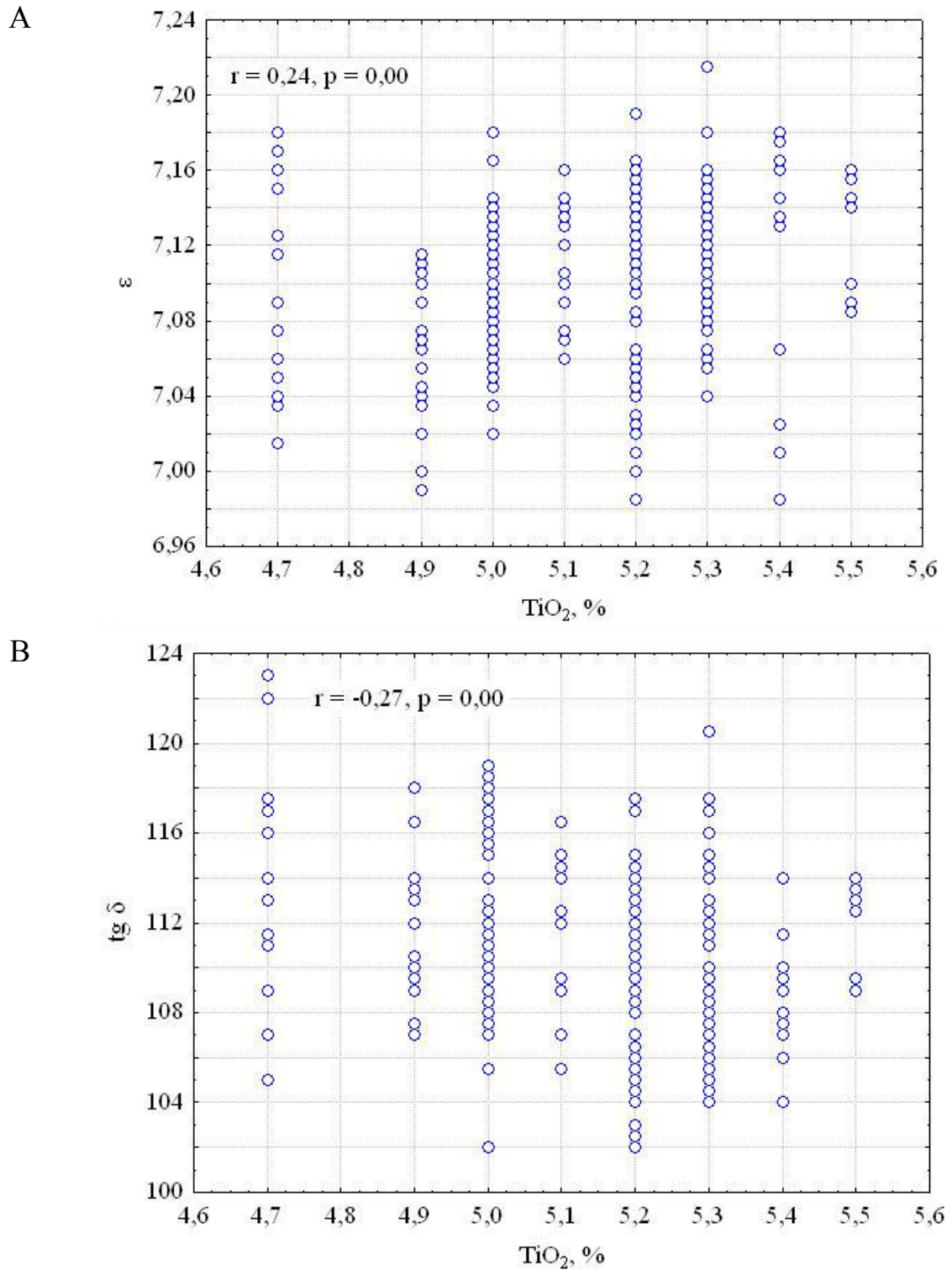


Рис. 3.14 Диаграммы рассеяния для ε (А) и $\operatorname{tg} \delta \cdot 10^4$ (В) в зависимости от содержания TiO_2

Из представленных в табл. 3.12 данных следует, что для всех рассмотренных свойств материала значимые связи в исследуемом диапазоне их варьирования могут, как и в предыдущем случае, обозначать лишь некоторую тенденцию. Например, с увеличением процентного содержания фракции $> 63\text{мкм}$ можно ожидать некоторого уменьшения времени набора или $\text{tg } \delta$.

То же самое можно наблюдать и при исследовании взаимосвязи между свойствами материала и номером формовочного комплекта, месяцем формования, партией стекла: связь либо отсутствует, либо наблюдается лишь некоторая тенденция (табл. 3.13).

Таблица 3.13 – Коэффициенты парной корреляции между $N_{\text{фк}}$, месяцем формовки, партией стекла и свойствами материала оболочек
(число оболочек = 248)

Параметр	ρ	ε	$\text{tg}\delta \cdot 10^4$	σ_u
$N_{\text{фк}}$	0,05	0,06	-0,01	0,08
месяц формовки	0,08	-0,24	0,03	-0,15
партия стекла	0,09	-0,22	0,09	-0,15

Узость интервалов варьирования входных переменных является, возможно, причиной отсутствия значимой корреляции их с выходными параметрами. Однако узкая область факторного пространства входных переменных обеспечивает и небольшую изменчивость выходных параметров, что приводит к их воспроизводимости.

Анализ количества брака за исследуемый период показал, что из общего количества отформованных 453 заготовок количество забракованных составило 150 шт. (33%). На рис. 3.15 представлено распределение числа оболочек, вышедших в брак на разных технологических стадиях (диаграмма Парето).

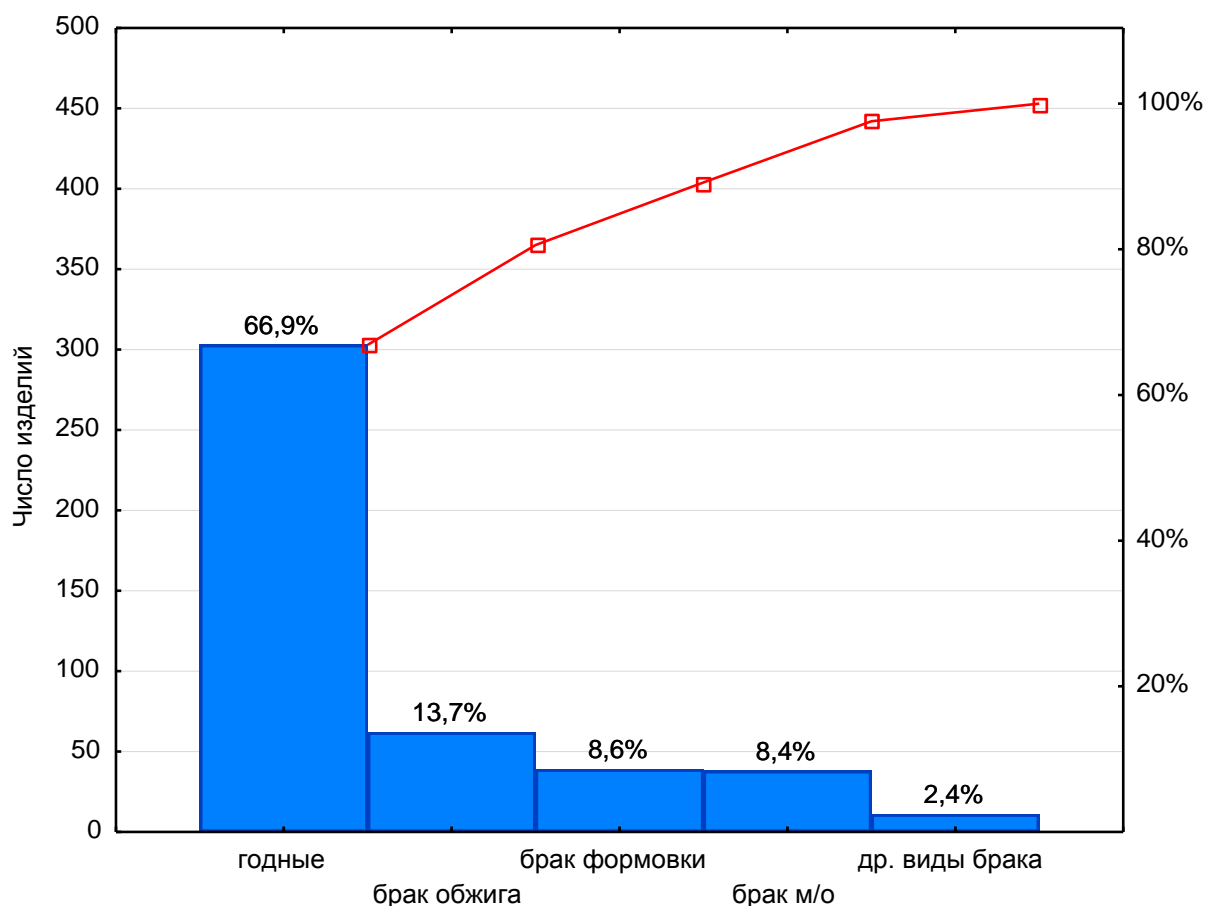


Рис. 3.15 Соотношение числа забракованных изделий ОТИ 742 по этапам ТП

Как видно из данного рисунка, наибольшее количество брака наблюдалось на стадиях обжига, формовки и механической обработки (м/о) изделий (13,7; 8,6 и 8,4 % соответственно). В некоторых случаях из-за отсутствия информации о причинах брака не удалось идентифицировать брак по технологическим стадиям.

Статистический анализ взаимосвязи соотношения годен/брак с проанализированными параметрами ТП не установил значимого влияния последних – с идентичными параметрами были изготовлены и годные, и забракованные оболочки. Возможно, на процент брака при производстве оказывает влияние ряд недокументированных факторов, не отраженных в технологической документации и не всегда контролируемых. К этим факторам могут относиться как дополнительные технологические параметры, так и факторы не технологического характера, например, замена технологической оснастки, нарушения работы печей обжига, сменность, погрешности измерительных систем, а также культура

производства. В связи с этим рекомендовано продолжать набор статистики по ТП, а также провести дополнительное исследование по выявлению факторов, которые могут существенно влиять на процент брака в производстве.

3.2. Оценка качества технологических процессов производства

Рассеивание показателей качества изделий подразделяется на неизбежное, обусловленное случайными погрешностями производства, возникающими из-за колебаний качества сырья, условий производства (в пределах допустимых отклонений) и устранимое, представляющее собой систематическую погрешность производства, возникающую в результате сбоев, нарушений технологического режима, разладки оборудования и т.д.

Контрольные карты, как один из методов контроля стабильности ТП, отражают динамику изменения показателей качества в течение времени и позволяют отслеживать состояние технологического процесса и воздействовать на него до того, как он выйдет из-под контроля [109, 110]. Основная идея построения таких карт состоит в графическом отображении значений некоторых статистик (например, выборочных средних, выборочных размахов, значений отдельных наблюдений, скользящих размахов и т.д.) и визуальном контроле над их изменением в течение всего технологического процесса.

На рис. Б.30-Б.39 приведены в качестве примера карты индивидуальных значений и скользящих размахов средних значений пределов прочности при трехточечном изгибе за последние 5 лет, полученных по 10 образцам, вырезанным из технологического припуска оболочек изделий ОТИ 395 и ОТИ 742, качество ТП производства которых было рассмотрено в предыдущем разделе. На представленных рисунках указаны также установленные для σ_u контрольные допуски – 39,2 и 108 МПа соответственно для ОТИ 395 и ОТИ 742.

Представленные контрольные карты позволяют наглядно проследить процесс изменения значений σ_u , и вовремя принять меры при наметившемся их сдвиге в сторону контрольных границ.

Контрольные карты можно строить не только по технологическим параметрам и выходным свойствам материала, но также и по коэффициенту запуска на соответствующей технологической операции или количеству брака. Следует отметить также, что для построения таких карт и управления с помощью них ТП производства необходима информация о браке в реальном режиме времени.

Динамика средних значений предела прочности и 95%-ных доверительных интервалов σ_u за 2010г. – I полугодие 2014г. изображена на рис. 3.16 и 3.17 соответственно для изделий ОТИ 395 (НИАСИТ) и ОТИ 742 (ОТМ-357), а в табл. 3.14 приведены статистические параметры σ_u и параметры распределения Вейбулла, оцененные по графическому методу.

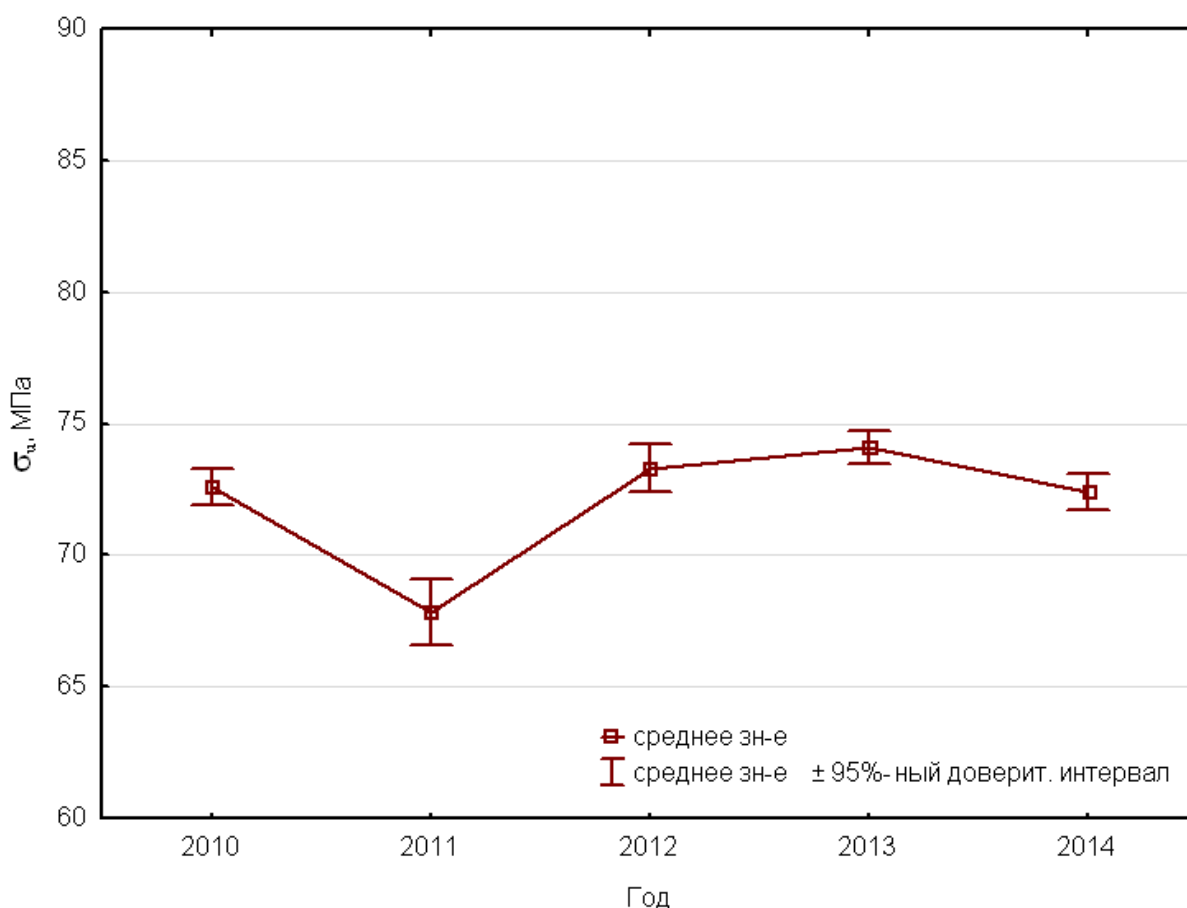


Рис. 3.16 Динамика за последние 5 лет предела прочности при изгибе образцов изделия ОТИ 395 с оболочкой из материала НИАСИТ

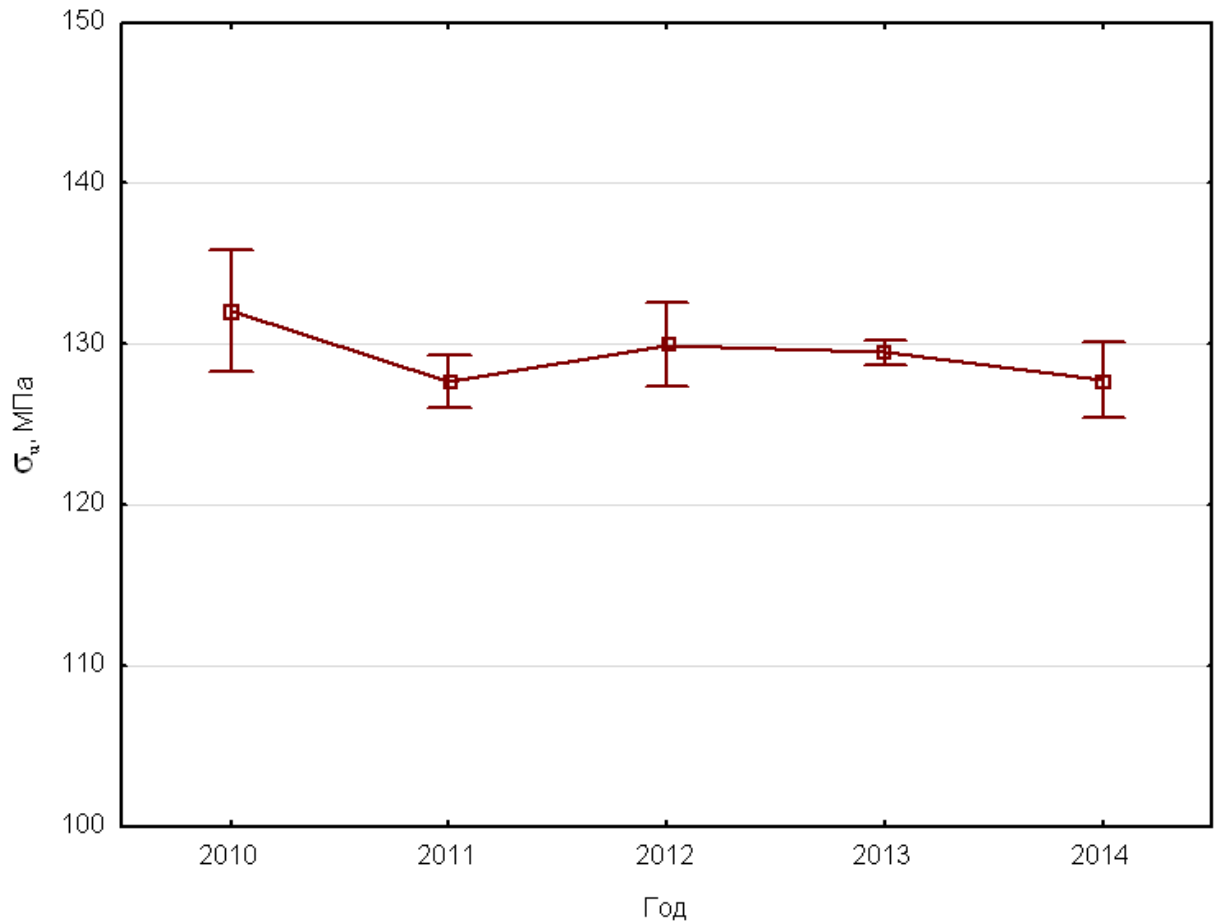


Рис. 3.17 Динамика за последние 5 лет предела прочности при изгибе образцов изделия ОТИ 742 с оболочкой из материала ОТМ-357

Таблица 3.14 – Статистические параметры σ_u и параметры Вейбулла по годам

Материал	Год	Среднее зн-е \pm станд. откл., МПа	Коэф. вариации, %	m	σ_c , МПа
НИАСИТ	2010	73,18 \pm 7,07	9,7	9,0	76,68
	2011	68,85 \pm 7,24	10,5	8,6	71,77
	2012	73,42 \pm 6,29	8,6	9,8	77,15
	2013	74,14 \pm 5,78	7,8	10,5	77,75
	Ипол. 2014	72,66 \pm 5,08	7,0	10,3	76,05
ОТМ-357	2010	132,74 \pm 10,24	7,7	9,5	139,03
	2011	127,42 \pm 10,02	7,9	8,9	134,84
	2012	130,38 \pm 10,95	8,4	8,2	137,85
	2013	129,44 \pm 7,64	5,9	10,2	135,8
	Ипол. 2014	128,23 \pm 7,86	6,1	9,3	130,21

Из представленных данных видно, что начиная с 2011г, наблюдается тенденция к увеличению σ_u для обоих материалов, с незначительным снижением в I полугодии 2014 г. – на 2,0 и 0,9% для НИАСИТ и ОТМ-357 соответственно по сравнению с 2010г. Возможно, это связано с меньшим объемом выборки, т.к. календарный год еще не закончился. Дисперсионный анализ показал значимое различие ($p < 0,05$) σ_u в 2011 г. от σ_u в 2010 г. и 2012-I полугодии 2014 г. для ОТИ 395 и отсутствие различий ($p > 0,05$) средних пределов прочности за исследуемый временной период для ОТИ 742.

Коэффициенты вариации пределов прочности при изгибе находятся на уровне 7,0...10,5 % и 5,9...8,4 % для изделий ОТИ 395 и ОТИ 742 соответственно, модули Вейбулла незначительно колеблются за рассматриваемый период, что говорит о стабильной однородности структур обоих материалов.

Для оценки стабильности ТП производства изделий ОТИ 395 и ОТИ 742 выполнен расчет показателей пригодности и воспроизводимости [111]. Поскольку для σ_u установлен только нижний контрольный допуск, то были рассчитаны нижние индексы пригодности P_{PL} и воспроизводимости C_{PL} .

Значение C_{PL} равно разности 50%-ной квантили распределения σ_u и нижней границы поля допуска σ_L , деленной на длину нижнего опорного интервала. Для случая симметричного нормального закона распределения σ_u

$$C_{PL} = \frac{\bar{\sigma} - \sigma_L}{3S_I}, \quad (3.1)$$

где S_I – собственная изменчивость стабильного по разбросу процесса, зависящая только от влияния обычных (общих) причин вариаций и вычисленная по данным, которые были использованы для построения контрольных карт.

Индекс пригодности процесса отражает устойчивость процесса, стабильность которого по разбросу не подтверждена. Значение нижнего индекса пригодности P_{PL} определяется аналогично C_{PL} , с тем исключением, что нижний опорный интервал для симметричного нормального закона распределения σ_u равен $3 \cdot S_T$

$$P_{PL} = \frac{\bar{\sigma} - \sigma_L}{3S_T}, \quad (3.2)$$

где S_T – полная изменчивость процесса, зависящая от влияния как случайных (обычных), так и неслучайных (особых) причин вариаций и равная выборочному стандартному отклонению S_{σ_u} .

В табл. 3.14 приведены значения нижних индексов пригодности P_{PL} и воспроизводимости C_{PL} , и их отношение, называемое *индексом стабильности*, для параметра σ_u за последние 5 лет. Графически динамика изменения P_{PL} и C_{PL} представлена на рис. 3.18 и 3.19. Стабильность по разбросу среднего предела прочности при изгибе обоих изделий подтверждена согласно [110]. Поэтому значения P_{PL} носят лишь информационный характер.

Как видно из табл. 3.14, значения C_{PL} находятся на приемлемом уровне, оба процесса являются статистически управляемыми. При этом для кварцевой керамики наблюдается положительная динамика процесса по $\sigma_u - C_{PL}$ возрастает с 2010г. и в настоящее время достигает уровня 2,828. Технологический процесс для стеклокерамики устойчив с небольшими колебаниями, существенно не отражающимися на его качестве, $C_{PL} = 1,341$ в I полугодии 2014г., что выше приемлемого уровня 1,330. Индексы стабильности варьируются на уровне 0,60-0,80 для НИАСИТ и 0,50-0,64 для ОТМ-357.

Таблица 3.14 – Индексы пригодности, воспроизводимости и стабильности

Материал	Индексы	Год				
		2010	2011	2012	2013	I полуг. 2014
НИАСИТ	C_{PL}	2,422	2,288	2,714	2,517	2,828
	P_{PL}	1,602	1,365	1,814	2,015	2,195
	P_{PL} / C_{PL}	0,661	0,596	0,668	0,801	0,776
ОТМ-357	C_{PL}	1,450	1,321	1,327	1,483	1,341
	P_{PL}	0,805	0,646	0,681	0,935	0,858
	P_{PL} / C_{PL}	0,556	0,489	0,513	0,631	0,640

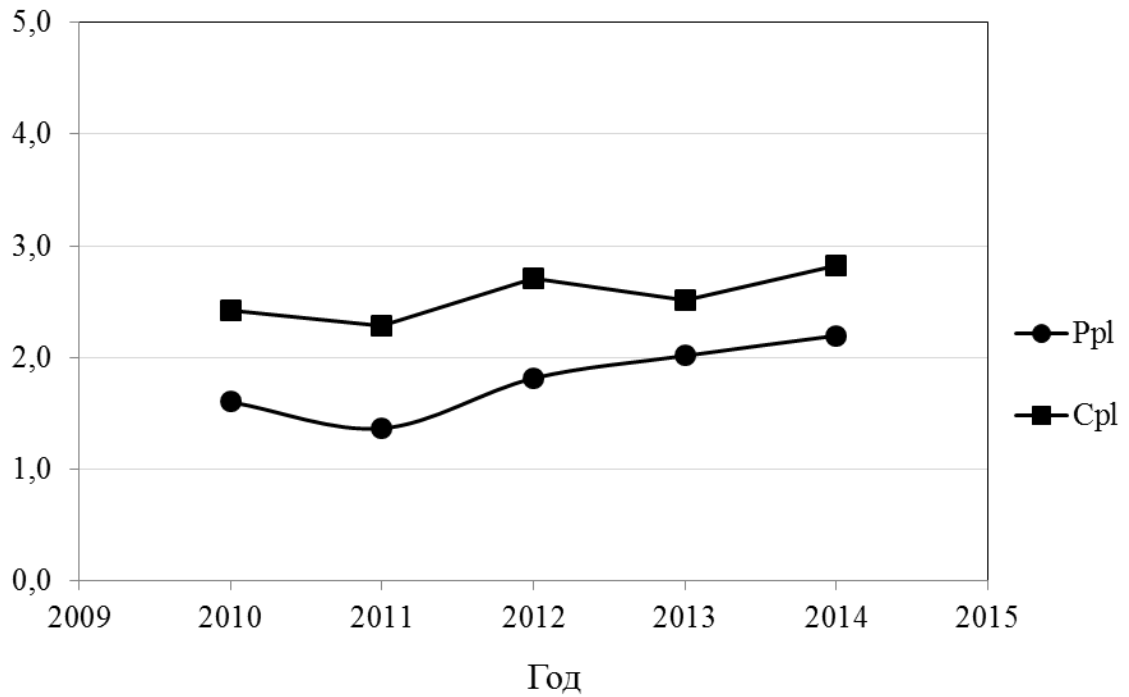


Рис. 3.18 Динамика индексов пригодности и воспроизводимости для предела прочности при изгибе изделия ОТИ 395 (НИАСИТ)

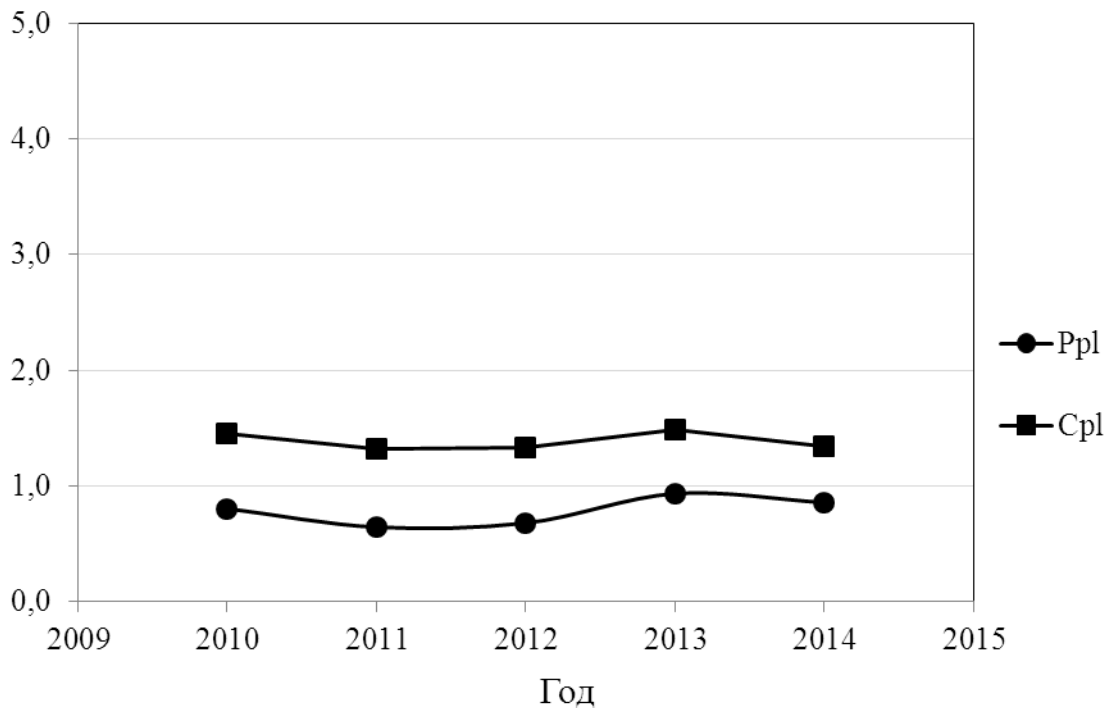


Рис. 3.19 Динамика индексов пригодности и воспроизводимости для предела прочности при изгибе изделия ОТИ 742 (ОТМ-357)

Таким образом, на основе проведенного в работе исследования ТП производства изделий ОТИ 395 и ОТИ 742, можно сформулировать систему оценки качества, в том числе и стабильности, ТП производства изделий с оболочками

из кварцевой керамики и стеклокерамики, которая базируется на основных этапах статистической методики «шесть сигм» (DMAIC) и включает:

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

3.3. Выводы и рекомендации

1. Проведен статистический анализ ТП производства изделий с оболочками из кварцевой керамики НИАСИТ и стеклокерамики ОТМ-357 на примере серийно выпускаемых изделий ОТИ 395 и ОТИ 742. Установлено, что в большинстве случаев анализируемые технологические параметры и основные свойства материалов изделий за исследуемый период времени находятся в установленных технологической документацией допусках и имеют нормальные функции распределения, что является одной из характеристик стабильности рассматриваемых ТП.

2. Средствами статистического анализа изучено влияние технологических параметров на физико-технические свойства материалов НИАСИТ и ОТМ-357 в изделиях. Наличие в серийном производстве устойчивых взаимосвязей между плотностью и пределом прочности при изгибе, между плотностью и диэлектрической проницаемостью материала в изделиях, которые были замечены и установлены еще 20-25 лет назад, также подтверждает стабильность технологии производства и качество изделий на сегодняшнем этапе.

3. Для контроля и своевременного реагирования на сдвиги в ТП рекомендуется использовать контрольные карты Шухарта, которые необходимо строить для основных параметров ТП и свойств материалов в изделиях.

4. Доказана стабильность разброса предела прочности при изгибе материалов НИАСИТ и ОТМ-357 за последние 5 лет. Значения соответствующих ин-

дексов воспроизводимости находятся на достаточно высоких уровнях: для материала НИАСИТ $C_{PL} > 1,67$, что свидетельствует о том, что появление брака в ТП не прогнозируется; для материала ОТМ-357 – $1,67 > C_{PL} \geq 1,33$, что является идеальным состоянием процесса [109].

5. Разработана система оценки качества ТП производства изделий с облочками из кварцевой керамики и стеклокерамики, которую рекомендуется использовать систематически и в реальном режиме времени для управления качеством ТП и предотвращения непредвиденных выходов изделий в брак на различных стадиях ТП, в том числе и при натурных испытаниях.

ГЛАВА 4. ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЛА ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

4.1. Анализ и моделирование неопределенностей при разработке элементов ЛА

Процессы проектирования сложных физических систем, каковыми являются конструкции любых ответственных изделий машиностроения, усложняются наличием у большинства важных параметров и характеристик конструкции и конструкционных материалов случайных значений, зависящих от ряда подчас неизвестных факторов. Такого рода случайности в параметрах принято называть неопределенностями, т.е. потенциальной неполноценностью в любой фазе моделирования или экспериментирования [112, 113].

Неопределенности подразделяются на преодолимые и непреодолимые. Преодолимые неопределенности обычно вызываются нехваткой данных, знаний (например, неполной информацией, плохим пониманием физических процессов), неточно определенными параметрами системы (по малым и нерепрезентативным выборкам), нарушениями технологического процесса, упрощениями при моделировании, человеческими ошибками и могут быть уменьшены за счет увеличения объема данных, лучшего понимания проблемы, более строгой проверки качества и т.п.

Непреодолимые неопределенности вызваны явлениями случайной природы и не могут быть уменьшены за счет увеличения данных или знаний. Непреодолимые неопределенности происходят из-за врожденной изменчивости моделируемых физических систем.

При исследовании элементов ЛА и условий их эксплуатации встречаются оба типа неопределенностей. Например, такой геометрический параметр как толщина стенки оболочки варьируется в некотором допуске от номинального значения. Чем тщательнее будет происходить механическая обработка стенки оболочки, тем этот допуск будет меньше, однако из-за особенностей применяемых инструментов полностью его устранить не удастся. Физико-механические

и теплофизические свойства керамических материалов внутренне по своей природе имеют существенные рассеяния вокруг средних значений, определяемые врожденными распределениями дефектов в их структуре и спецификой технологических процессов. Повышение контроля качества за процессом производства, несомненно, уменьшит значения неопределенностей (а некоторые может и устранил), но полностью от них избавиться не позволяет.

Неопределенности в эксплуатационных нагрузках в виду случайности природных явлений являются непреодолимыми. Колебания тяги двигателя, «рыскание» ЛА при отклонениях рулей, неточности схемы управления вызывают дополнительные случайные колебания аэродинамической нагрузки, в том числе воздействующей на головные элементы ЛА. Стохастическое изменение скорости, плотности набегающего потока, угла атаки ЛА вызывают различную температуру торможения частиц потока. Это приводит к неравномерному нагреву поверхности изделия. При хранении и боевом дежурстве на изделие действуют климатические факторы: влага, тепло, холод, солнечная радиация. Эти факторы могут вызвать влагонасыщение материала, при длительном хранении – его старение, т.е. изменение физико-механических и/или радиотехнических свойств. Природа этих изменений, обусловленная случайностью действующих на изделие факторов, также случайна.

Все неопределенности, которые сопутствуют конструкции изделия в процессах производства и эксплуатации, в конечном счете, сказываются на соотношении нагрузки и несущей способности и, тем самым, на его прочностной надежности. Поэтому важно на начальных стадиях проектирования конструкции и выбора конструкционных материалов провести количественный анализ неопределенностей, цель которого заключается не столько в уменьшении неопределенностей (это достигается только приобретением дополнительной информации и заполнением отсутствующих данных), сколько в оценке влияния неопределенностей входных параметров конструкции на ее выходные характеристики, в частности на прочностную надежность.

Анализ неопределенностей и учет их в процессе проектирования элементов ЛА включает следующие *стадии*:

- 1) установление входных случайных параметров;
- 2) выбор метода моделирования неопределенностей входных случайных параметров;
- 3) оценка выходных неопределенностей модели;
- 4) анализ чувствительности выходных параметров модели к неопределенностям входных параметров.

Для оценки прочностной надежности изделий ЛА используем его функцию работоспособности в виде «условия прочности»

$$g(X) = [\sigma] - \sigma_{\max}(X), \quad (4.1)$$

где $[\sigma]$ – допустимый предел прочности керамической оболочки при растяжении; $\sigma_{\max}(X)$ – максимальные расчетные напряжения, возникающие в конструкции под действующей нагрузкой. Вектор X состоит из физико-механических и теплофизических свойств материалов оболочки, герметика и шпангоута, геометрических параметров конструкции и условий нагружения.

Первоначально перед исследованием неопределенностей необходимо установить, какие переменные модели подвержены изменению, т.е. являются случайными, а какие нет, т.е. являются детерминированными.

Далее для случайных переменных, исходя из экспериментальной информации и/или физических законов, необходимо установить диапазоны их варьирования и способ описания.

Способы описания неопределенностей зависят, как правило, от типа физической системы и соответствующей модели. Klir в своей работе [99] представил следующие способы описания неопределенностей:

- классическая теория множеств;
- теория вероятности;
- теория нечетких множеств;
- теория нечеткой меры;

– теория неточных множеств.

В настоящее время в большей степени применяют методы теории нечетких множеств и теории вероятностей. Вероятностный анализ является наиболее широко используемым методом, в котором входные и выходные параметры модели описываются вероятностными распределениями: нормальное, равномерное, логнормальное, гамма-, экспоненциальное распределения или распределение Вейбулла.

Границы варьирования и/или статистические функции распределения могут быть найдены одним из нижеперечисленных способов [49]:

- накопление и обобщение статистической информации;
- литературные данные по изделиям-аналогам;
- экспертные оценки и др.

Наиболее часто встречающимся в разнообразных задачах является нормальное распределение случайных переменных. Из центральной предельной теоремы известно, что сумма большого количества тождественных независимых случайных переменных приблизительно нормальна. Фактически эта теорема имеет силу даже при более слабых условиях – переменные не обязательно должны быть тождественными и независимыми. Именно эта теорема объясняет, почему с нормальными случайными переменными так часто сталкиваются в природе. Когда наблюдается совокупное действие большого количества небольших случайных факторов, получающаяся случайная переменная является нормальной.

После того, как установлены характеристики входных и модельных неопределенностей следует этап их моделирования, или распространения, т.е. оценка выходных неопределенностей модели и получение распределения целевой функции, задающей критерий разрушения.

Все методы моделирования неопределенностей можно разделить на два класса: граничные и вероятностные методы [50, 114, 115].

Граничные методы ограничивают пространство изменения переменных верхней и нижней границами и/или разбивают пространство каждой перемен-

ной на диапазоны с последующим выполнением одного из методов планирования эксперимента (полный факторный эксперимент, дробный факторный эксперимент, метод латинского гиперкуба и т.п.). В случае, например, 10 выбранных случайных переменных при использовании полного факторного эксперимента необходимое количество расчетов составляет $3^{10} \sim 60$ тыс., выполнить которое, разумеется, физически не представляется возможным.

Те методы, в которых кроме (или вместо) допустимых границ задается вероятность принятия переменной некоторого значения, относят к вероятностным методам. Как правило, данные методы основываются на моделировании значений переменных, подчиняющихся априори выбранным функциям распределения с заданными параметрами распределения. Одним из основных представителей данного класса методов является метод статистических испытаний или метод Монте-Карло (ММК) [116].

Главным преимуществом ММК над всеми другими методами является то, что он не ограничивает путь, которым должен быть проведен анализ и при достаточно большом числе моделирований сходится к одному и тому же результату. Моделирование ММК является широко используемой универсальной техникой для вероятностного анализа конструкций и удовлетворяет двум главным целям: подкрепление и обоснование аналитических методов и решение больших, сложных систем, когда аналитические приближения не осуществимы. Второе встречается, когда целевая функция является функцией многих переменных или не может быть явно выражена в терминах случайных переменных, что и относится к элементам ЛА с функцией работоспособности (4.1). В этом случае ее можно оценить только посредством численного расчета НДС конструкции.

4.2. Расчет напряженного-деформированного составных оболочечных конструкций элементов ЛА

При движении по заданной траектории ЛА непрерывно изменяет свою скорость, положение и ориентацию в пространстве. При этом происходит изме-

нение внешнего статического давления, условий обтекания воздушным потоком, изменение линейных и угловых ускорений по всем отсекам ЛА. Все это приводит к изменению силового и теплового воздействий на корпус ЛА, в частности на его головную часть. Из всех внешних воздействий можно выделить главные: аэродинамическое давление на корпус, инерционные нагрузки, аэродинамический нагрев.

Расчет $\sigma_{\max}(X)$ основан на решении задачи о НДС замкнутых оболочек вращения, соединенных внахлестку через промежуточный упругий слой [117-119].

Исследование реального трёхмерного тела, каковым является оболочка вращения, путём введения гипотез о деформированном состоянии по толщине оболочки, сводится к исследованию некоторого приведённого двумерного тела. В качестве поверхности приведения применяется срединная поверхность оболочки, каждой точке которой приписываются некоторые значения жёсткости, эквивалентные в статическом смысле жёсткости реальной оболочки.

Для перехода от исследования реальной оболочки к исследованию замкнутой поверхности вращения, принята гипотеза С. П. Тимошенко [120]. В соответствии с этой гипотезой элемент, нормальный к срединной поверхности оболочки до деформации, остаётся прямолинейным, но не перпендикулярным к деформированной срединной поверхности. Длина нормального элемента при деформации не изменяется. Данная гипотеза учитывает наличие в оболочке поперечных сдвигов, равномерно распределённых по толщине.

Применение гипотезы С. П. Тимошенко для описания состояния соединяемых оболочек объясняется тем, что

- керамическая оболочка относится к типу оболочек средней толщины, для расчёта которых необходим учет поперечных сдвигов при определении НДС;
- удаётся математически компактно получить разрешающее уравнение в векторно-матричной форме, относительно искомого вектора перемещений;

– при численном решении задачи о НДС оболочки применение уравнений Тимошенко позволяет расширить диапазон характеристик оболочки, при которых еще не наблюдаются признаки неустойчивости численного счёта.

Специальные требования к геометрии изделия приводят к тому, что с целью их удовлетворения меридиан оболочки составляется из нескольких кривых, имеющих различное аналитическое задание.

Зона нахлесточного соединения состоит из керамической оболочки, клеевой прослойки и шпангоута [5, 117], каждый из которых рассматривается в математической модели как оболочка, имеющая свою поверхность приведения, т.е. для повышения точности определения НДС обеспечивается учет изменения метрики при переходе от слоя к слою.

Для описания деформационных характеристик керамической оболочки и металлического шпангоута принимается модель упругого поведения.

В отношении клеевого слоя принято, что материалы клеев работают лишь на поперечный сдвиг и трансверсальное обжатие, причём напряжения сдвига и обжатия равномерно распределены по толщине клея, что справедливо при относительно небольших толщинах клеевой прослойки (0,3-0,6мм).

Модель поведения материалов элементов, из которых состоит изделие, учитывает ортотропию их свойств. Вообще говоря, керамические материалы по своим свойствам изотропны. Однако последние достижения в технологии керамики позволяют ожидать появления армированных в требуемых направлениях материалов и, как следствие, выраженных ортотропных свойств. Параметры упругого поведения всех материалов предполагаются зависящими от температуры.

Внешняя или эксплуатационная силовая нагрузка, действующая на изделие – это растягивающая, сжимающая или перерезывающая силы, изгибающий или крутящий моменты, внутреннее давление, продольная или поперечная перегрузка и т.д., а также любые их комбинации. Модель действующих на изделие нагрузок учитывает двумерный характер силового воздействия с тем ограниче-

нием, что их функции достаточно плавно изменяются и допускают представление в виде разложения в ряды Фурье.

Внешняя температурная нагрузка задается в виде распределения температур по толщине несущих оболочек.

Передача усилий от шпангоута происходит через неразъемное соединение с кольцом, которое, в свою очередь, крепится к соседнему отсеку одним из традиционных способов: фланцевым, резьбовым и др. соединениями. При определении НДС необходимо учитывать конкретный тип его соединения с соседним отсеком. Например, на НДС в керамической оболочке оказывают влияние число болтов фланцевого соединения, их расположение, диаметр. Однако учет параметров соединения существенно осложняет решение задачи, поэтому целесообразно конкретный тип соединения представить некоторой моделью, отражающей поведение соединения в интегральном смысле. Закрепление шпангоута в этом случае может быть представлено заданием на торце шпангоута кинематических и/или статических условий, что позволяет записать условия закрепления в обобщённом виде и путём задания соответствующих коэффициентов моделировать спектр практически всех важных видов закрепления.

Математическая модель, описывающая НДС одно- и трехслойной оболочки вращения, выводится на основе

- уравнений равновесия элементов оболочки;
- уравнений деформаций (перемещений) срединной поверхности (кинематические соотношения);
- физических соотношений, выражающих связь усилий, возникающих в оболочке в результате нагружения, с деформациями (обобщенный закон Гука).

Введем векторы:

- обобщенных перемещений $\varphi = \{U, V, W, \gamma_1, \gamma_2\}$, где U и V – значения перемещений точек срединной поверхности по меридиональной и окружной координатам соответственно; W – величина нормального прогиба; γ_1 и γ_2 – углы поворота нормали к срединной поверхности по меридиональной и окружной координатам;

– деформаций $\varepsilon = \{\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{12}, \kappa_1, \kappa_2, \kappa_{12}, \varepsilon_{13}, \varepsilon_{23}\}$, где $\varepsilon_{ij}, i = \overline{1,2}, j = \overline{1,3}$ – компоненты тангенциальной и трансверсальной деформации; $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_{12}$ – компоненты изгибной деформации;

– усилий и моментов $T = \{T_1, T_2, S, M_1, M_2, H, Q_1, Q_2\}$, где T_1, T_2 и S_1, S_2 – нормальные (продольные) и сдвигающие усилия в меридиональном и окружном направлениях соответственно; Q_1, Q_2 – перерезывающие усилия в сечениях оболочки, перпендикулярных к координатным линиям; M_1, M_2 и H_1, H_2 – изгибающие и крутящие моменты в сечениях оболочки, перпендикулярных к координатным линиям;

– усилий и моментов $\psi = \{T_1, S, Q_1, M_1, H\}$, входящих в граничные условия в поперечных сечениях оболочки, где $S = S_1 - k_2 H_2 = S_2 - k_1 H_1$, как следствие из уравнений равновесия, k_1, k_2 – кривизны оболочки.

Все усилия и моменты, действующие на элементарный объем оболочки, наглядно изображены на рис. 4.1.

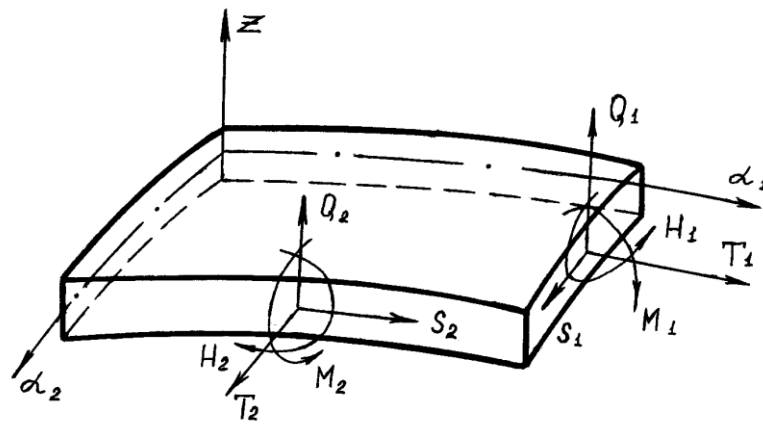


Рис. 4.1 Усилия, действующие на элемент оболочки

Уравнения равновесия и перемещений записываются в виде систем дифференциальных уравнений с частными производными по меридиональной и окружной координатам. Для решения полной системы уравнений, описывающих НДС оболочек, соосно соединенных через упругий слой, исходная дву-

мерная задача редуцируется к системе одномерных задач. С этой целью для оболочек вращения в направлении окружной координаты θ необходимо выполнить условие периодичности решения. Тогда все компоненты, характеризующие напряженное состояние оболочки, разлагаются в ряды Фурье по окружной координате, что позволяет произвести разделение переменных.

В результате аналитических преобразований получается разрешающая система уравнений, которая в векторно-матричной форме записи выглядит следующим образом:

– уравнения равновесия

$$A_1\psi' + A_0T = \alpha, \quad (4.3)$$

– геометрические уравнения

$$\varepsilon = B_1\varphi' + B_0\varphi, \quad (4.4)$$

– физические соотношения для слоистой анизотропной оболочки

$$T = C_0\varepsilon + \beta, \quad (4.5)$$

где штрих – символ производной по осевой координате x , а прямоугольные матрицы A_0, A_1, B_0, B_1 и C_0 и вектора α и β состоят из коэффициентов правых и левых частей соответствующих уравнений.

Кроме того, очевидна связь векторов

$$\psi = KT. \quad (4.6)$$

После исключения из (4.3) с помощью (4.4)-(4.6) векторов ψ , T и ε получим искомое уравнение относительно вектора перемещений φ

$$P\varphi'' + Q\varphi' + R\varphi = \gamma, \quad (4.7)$$

где матричные коэффициенты P, Q, R и вектор правых частей γ являются комбинациями матриц и векторов уравнений (4.3)-(4.6).

Для обеспечения единственности решения задачи необходимо удовлетворить граничные условия на искомые функции. На граничном контуре срединной поверхности оболочки должны быть заданы перемещения (кинематические условия) или усилия (статические условия), т.е. должна быть задана система уравнений

$$\begin{cases} U(1 - \lambda_1) + T_1 \lambda_1 = \mu_1 \\ V(1 - \lambda_2) + S \lambda_2 = \mu_2 \\ W(1 - \lambda_3) + Q_1 \lambda_3 = \mu_3 \\ \gamma_1(1 - \lambda_4) + M_1 \lambda_4 = \mu_4 \\ \gamma_2(1 - \lambda_5) + H \lambda_5 = \mu_5 \end{cases} \quad (4.8)$$

где $\lambda_j, (j = \overline{1,5})$ равно 0, если заданы кинематические условия, 1, если заданы статические условия, $\mu_j, (j = \overline{1,5})$ – значения перемещений или усилий на торце оболочки.

Или в матричном виде

$$G\psi + H\varphi = \mu, \quad (4.9)$$

$$\text{где } G = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & & \\ & \lambda_2 & & & \\ & & \lambda_3 & & \\ & & & \lambda_4 & \\ & & & & \lambda_5 \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} 1 - \lambda_1 & & & & \\ & 1 - \lambda_2 & & & \\ & & 1 - \lambda_3 & & \\ & & & 1 - \lambda_4 & \\ & & & & 1 - \lambda_5 \end{bmatrix}, \quad \mu = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \\ \mu_4 \\ \mu_5 \end{bmatrix}.$$

Форма записи граничных условий в виде (4.9) позволяет присвоением коэффициентам λ_j, μ_j численных значений задать все практически важные условия крепления оболочек.

Учитывая связь ψ и φ и проведя ряд подстановок и преобразований, можно получить уравнения граничных условий, также выраженные через вектор искомых функций перемещений

$$\bar{G}\varphi' + \bar{H}\varphi = \bar{v}. \quad (4.10)$$

Получим разрешающее уравнение для участка соединения оболочек внахлестку. Для этого введем у основных переменных нижний индекс j , равный 1 – для наружной оболочки, 2 – для внутренней оболочки и 3 – для промежуточного слоя. Тогда НДС на участке соединения определяется решением системы уравнений

$$\begin{aligned} P_1 \varphi_1'' + Q_1 \varphi_1' + R_1 \varphi_1 &= \gamma_1^* \\ P_2 \varphi_2'' + Q_2 \varphi_2' + R_2 \varphi_2 &= \gamma_2^* \end{aligned} \quad (4.11)$$

Векторы γ_j^* отличаются от векторов γ_j тем, что в них кроме всех нагрузок вошли реакции взаимодействия оболочек с промежуточным слоем.

Для замыкания системы уравнений (4.11) и возможности их сведения к виду (4.7) необходимо ввести допущения о работе промежуточного слоя, построить на этом основании уравнения деформирования, выразить реакции промежуточного слоя через компоненты векторов φ_1 и φ_2 и определяющие функции для этого слоя. Тогда система уравнений (4.11) и уравнения деформирования слоя, записанные в векторном виде, составят искомое разрешающее уравнение для участка соединения оболочек.

Для промежуточного слоя будем использовать модель сплошной упругой среды, работающей на сдвиг и поперечное обжатие. Такой подход точно соответствует расчетным случаям клеевого соединения и образцов, и он легко распространяется на случаи гофрированных вставок, пружинных элементов и т.д. путем введения эквивалентного по упругим и прочностным свойствам сплошного слоя.

Используем простейшую и наиболее распространенную в теории трехслойных конструкций и клеевых соединений модель, основанную на допущении о линейном изменении по толщине слоя перемещений. В этой модели перемещения слоя определяются компонентами векторов φ_1 и φ_2 , что позволяет найти реакции слоя, используя закон Гука.

Таким образом, разрешающее уравнение для участка соединения оболочек включает в себя лишь связанную систему (4.11), которая после подстановки реакций слоя имеет вид

$$\begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1'' \\ \varphi_2'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_1 & 0 \\ 0 & Q_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1' \\ \varphi_2' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_1 + R_1^* & R_{12} \\ R_{21} & R_2 + R_2^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix}, \quad (4.12)$$

где дополнительные матричные коэффициенты R_i^* зависят от геометрических свойств промежуточного слоя.

Таким образом, задача о деформировании оболочек вращения, соосно соединенных через упругий слой, сводится к решению краевой задачи – векторно-матричного уравнения (4.12) с граничными условиями (4.10).

Как отмечалось выше, для нахождения максимальных напряжений в изделии под действием аэродинамического нагрева необходимо знать распределение температур по толщине несущих слоев. Определить распределение температур можно, решив одномерную нестационарную задачу о комбинированном переносе тепла в замкнутой системе бесконечных плоско параллельных пластин. Искомые температуры в каждой пластине описываются решением нестационарного уравнения теплопроводности при заданных условиях теплообмена с внешней средой.

Существенными ограничениями, в рамках которых ставится краевая задача, являются следующие. Поверхности слоев стенки считаются непрозрачными, серыми, излучающими и отражающими диффузно. Среда в пространстве совершенно прозрачна для теплового излучения (например, вакуум) и, следовательно, в теплообмене не участвует. Таким образом, радиационное взаимодействие с телами системы происходит только на их поверхности, а излучение, как и конвекция, если она присутствует, оказывается лишь граничным условием для процесса кондуктивного теплообмена внутри тела.

Рассмотрим пакет, состоящий из набора теплофизически разнородных слоев, причем соседние слои либо примыкают друг к другу, либо разделены зазором (рис. 4.2). Наличие процесса вынужденной конвекции в зазоре не приведет к принципиальным трудностям при решении задачи, поэтому для простоты считаем, что зазоры вакуумированы. Систему можно представлять целиком окруженной оболочкой из других твердых тел или открытых областей. Последними для пакета экранов служат полупространства, заполненные средой, примыкающие к внешним поверхностям первого и последнего (n -го) слоя. Эквивалентом открытой области часто берут поверхность с нулевой отражательной способностью или источник излучения, попадающего из окружающего про-

странства в замкнутую систему. Эти соображения определяют вид краевых условий для пакета экранов.

Каждый слой стенки с номером j характеризуется величинами k_j , c_j , γ_j , ε_j^- , ε_j^+ , u_j , и Δx_j , где k_j – коэффициент теплопроводности, c_j – удельная теплоемкость, γ_j – плотность материала, ε_j^- и ε_j^+ – полусферические интегральные степени черноты поверхностей j^- и j^+ , u_j – температура, Δx_j – его толщина. Знаки "–" и "+", употребляемые здесь, относятся, соответственно, к левой и правой поверхностям j -ого слоя. Зазоры между слоями пронумерованы слева направо от 1 до $n+1$, и о стыке слоев будем говорить как о пустом зазоре.

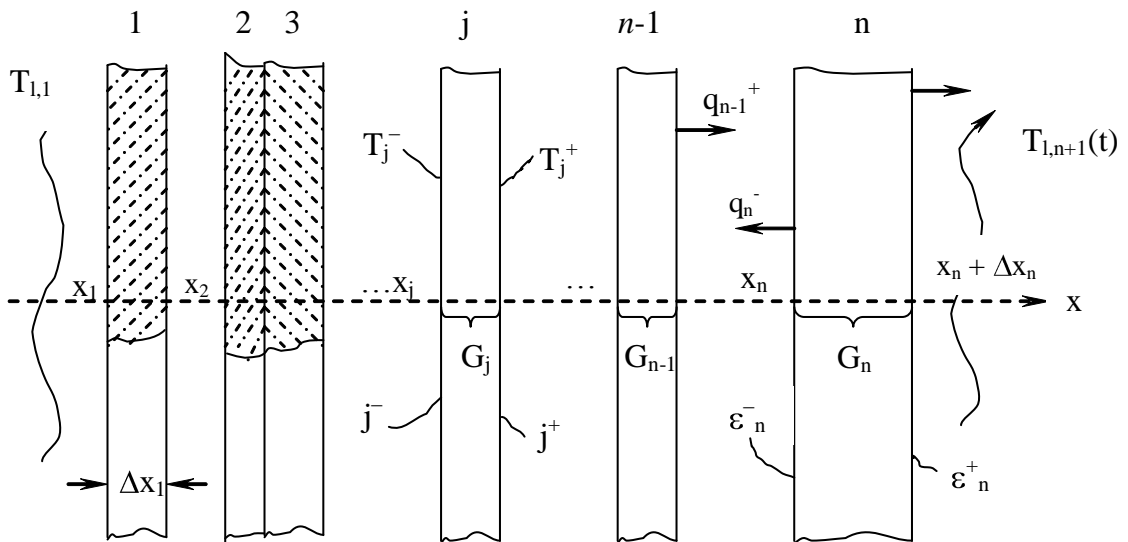


Рис. 4.2 Расчетная схема

Сформулируем теперь для уравнения теплопроводности краевую задачу, решение которой определяет распределение температур в пакете экранов. Пусть $G \subset R^1$ – конечный интервал на оси x , $G = \{x_1, x_n + \Delta x_n\}$, и задана конечная совокупность интервалов $\{G_j\}_{j=1}^n$, таких, что

$$\{G_j \mid G_j = \{x_j, x_j + \Delta x_j\} \subset G, \forall j\}, \text{ причем } \text{mes}(G / \bigcup_{j=1}^n G_j) \geq 0.$$

Если тепловой поток внутри j -го слоя подчиняется закону Фурье

$$q = -k_j(x, u_j) \frac{\partial u_j}{\partial x}, \quad (4.13)$$

то для каждого слоя получаем одномерное квазилинейное уравнение теплопроводности

$$c_j(x, u_j) \gamma_j(x) \frac{\partial u_j}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_j(x, u_j) \frac{\partial u_j}{\partial x} \right), \quad j = \overline{1, n}, \quad (4.14)$$

где $k_j = k_j(x, u_j) > 0, c_j = c_j(x, u_j) > 0$.

Требуется найти, вообще говоря, слабо разрывные в \overline{G}_j решения n уравнений типа (4.14), удовлетворяющих начальным условиям

$$u_j(x, t_0) = u_{j0}(x), \quad x \in \overline{G}_j, \quad (4.15)$$

а на границах $\Gamma_j = \overline{G}_j / G_j$ – краевым условиям вида

$$k_1 \frac{\partial u_1^-}{\partial x} = \alpha_e^{(1)} [u_1^- - T_{e,1}] + \varepsilon_1^- \sigma [(u_1^-)^4 - T_{e,1}^4], \quad (4.16)$$

$$-k_j \frac{\partial u_j^-}{\partial x} = c_{j-1, j} [(u_{j-1}^+)^4 - (u_j^-)^4] + \alpha_{j-1, j} [T_{e(j-1, j)} - u_j^-], \quad (4.17)$$

$$-k_j \frac{\partial u_j^+}{\partial x} = c_{j, j+1} [(u_j^+)^4 - (u_{j+1}^-)^4] + \alpha_{j, j+1} [-T_{e(j, j+1)} + u_{j+1}^-], \quad (4.18)$$

$$-k_n \frac{\partial u_n^+}{\partial x} = \alpha_e^{(n)} [u_n^+ - T_{e,n}] + \varepsilon_n^+ \sigma [(u_n^+)^4 - T_{e,n}^4]. \quad (4.19)$$

где α_e – коэффициент конвективного теплообмена, T_e – температура теплового потока, σ – коэффициент излучения черного тела. Первое слагаемое в правой части условий (4.16) и (4.19) соответствует конвективному тепловому потоку с известной температурой $T_e(t)$ и заданным коэффициентом конвективного теплообмена; второе слагаемое записано в предположении, что справедлив закон Кирхгофа, т.е. степень черноты поверхности равна поглотительной способности. Коэффициенты $c_{j, j+1}$ имеют вид

$$c_{j, j+1} = \frac{\sigma}{1/\varepsilon_j^+ + 1/\varepsilon_j^- - 1}. \quad (4.20)$$

При решении задачи учитывается ряд факторов, оказывающих влияние на условия теплообмена и напряженное состояние системы пластин:

- унос материала;
- изменение типа граничных условий во времени;
- переизлучение и конвекция в газовых зазорах;
- зависимость теплофизических и физико-механических свойств материала от температуры.

Расчет НДС и определение максимальных расчетных напряжений, возникающих в керамической оболочке, и необходимых для оценки ее прочностной надежности, рассмотрен на примере изделия с оболочкой из стеклокерамики ОТМ-357.

Исходные данные по физико-механическим и теплофизическим свойствам материалов для проведения расчета приведены в табл. 1.2 для ОТМ-357; в табл. 4.2 для герметика ВИКСИНТ У2-28НТ; в табл. 4.3 для материала шпангоута (Инвар 32 НКМБЛ); в табл. 4.4 для переходного шпангоута (ВТ-20). Геометрические параметры конструкции рассматриваемого изделия представлены в табл. 4.5; тепловое и силовое нагружения – на рис. 4.3 и 4.4 соответственно.

Таблица 4.2 – Значения физико-механических и теплофизических свойств герметика ВИКСИНТ У2-28НТ

Свойство	Температура, °С	Значение
E, МПа	0	8,00
	150	3,00
	200	2,00
	250	1,50
	300	1,00
	350	1,00
	375	1,00
	400	0,90

Свойство	Температура, °С	Значение
	420	0,80
μ	20	0,47
λ , Вт/м·К	20	0,1391
c , Дж/кг·К	20	2141
α , 1/К	0	2,30E-04
	250	2,50E-04
	300	3,00E-04
	350	3,20E-04
	375	3,50E-04
	400	3,70E-04
	420	4,00E-04

Таблица 4.3 – Значения физико-механических и теплофизических свойств материала шпангоута (Инвар 32 НКМБЛ)

Свойство	Температура, °С	Значение
E , МПа	20	145000
μ	20	0,30
λ , Вт/м·К	20	13,50
c , Дж/кг·К	20	488,00
α , 1/К	0	2,70E-06
	100	2,70E-06
	200	2,60E-06
	300	3,20E-06
	350	4,20E-06
	400	4,90E-06
	450	6,00E-06
	500	7,15E-06
ε	20	0,50

Таблица 4.4 – Значения физико-механических и теплофизических свойств материала переходного шпангоута (ВТ-20)

Свойство	Температура, °С	Значение
E, МПа	20	120000
	350	95000
	500	82000
μ	20	0,3
λ , Вт/м·К	100	8,79
	200	10,05
	300	10,89
	400	12,14
	500	13,82
	600	15,07
	700	16,75
	800	18
	900	19,68
с, Дж/кг·К	100	544
	200	586
	300	628
	400	670
	500	712
	600	754
	700	837
	800	880
	900	921
α , 1/К	100	8,80E-06
	200	8,90E-06
	300	9,00E-06
	400	9,20E-06
	500	9,30E-06
	600	9,50E-06

Свойство	Температура, °С	Значение
	700	9,70E-06
	800	9,70E-06
ε	100	0,21
	200	0,22
	300	0,23
	400	0,24
	500	0,25
	600	0,27
	700	0,39
	800	0,45
	900	0,58

Таблица 4.5 – Геометрические параметры конструкции

Параметр	Значение, м
Длина	0,524
Радиус внешней оболочки	0,200
Длина зоны склейки	0,055
Толщина керамической оболочки	
на однослойном участке	0,0042
на многослойном участке	0,0066
Толщина клеевой прослойки	0,0004
Толщина шпангоута	0,002

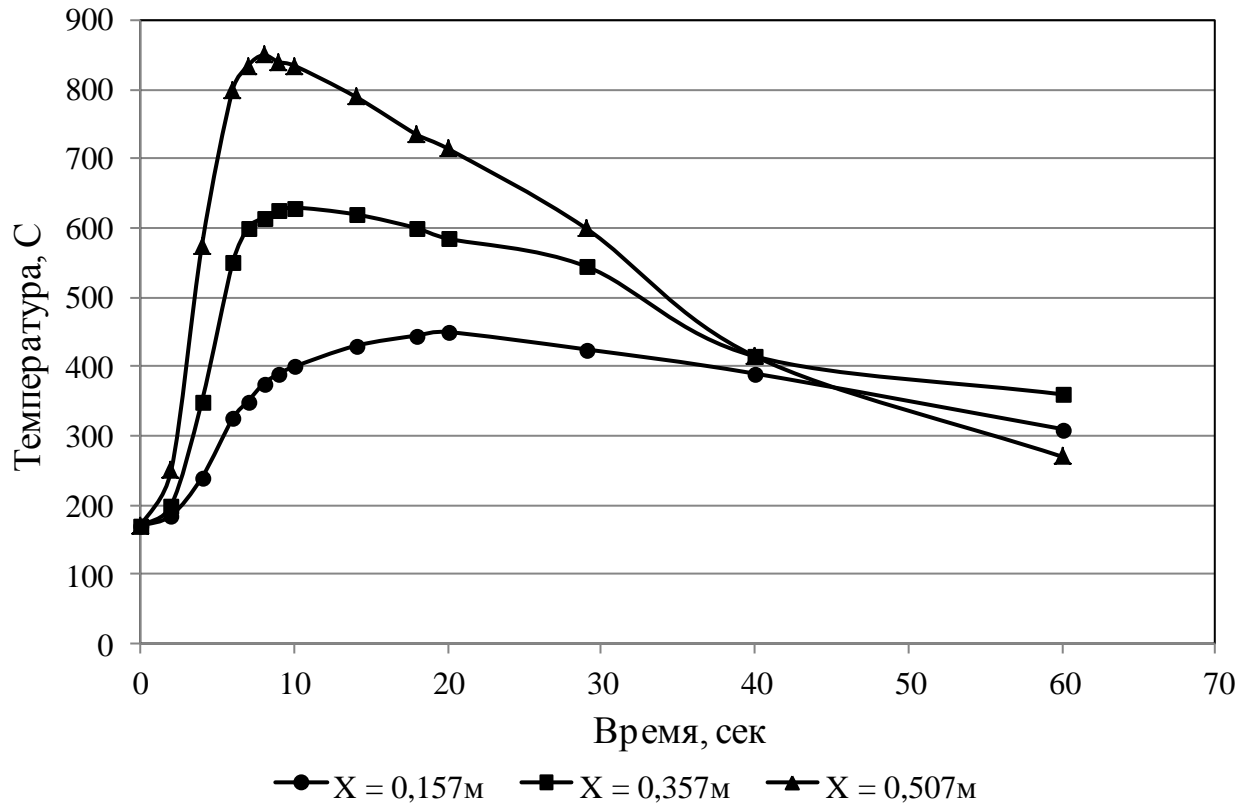


Рис. 4.3 Температурная нагрузка (X – расстояние от носка оболочки)

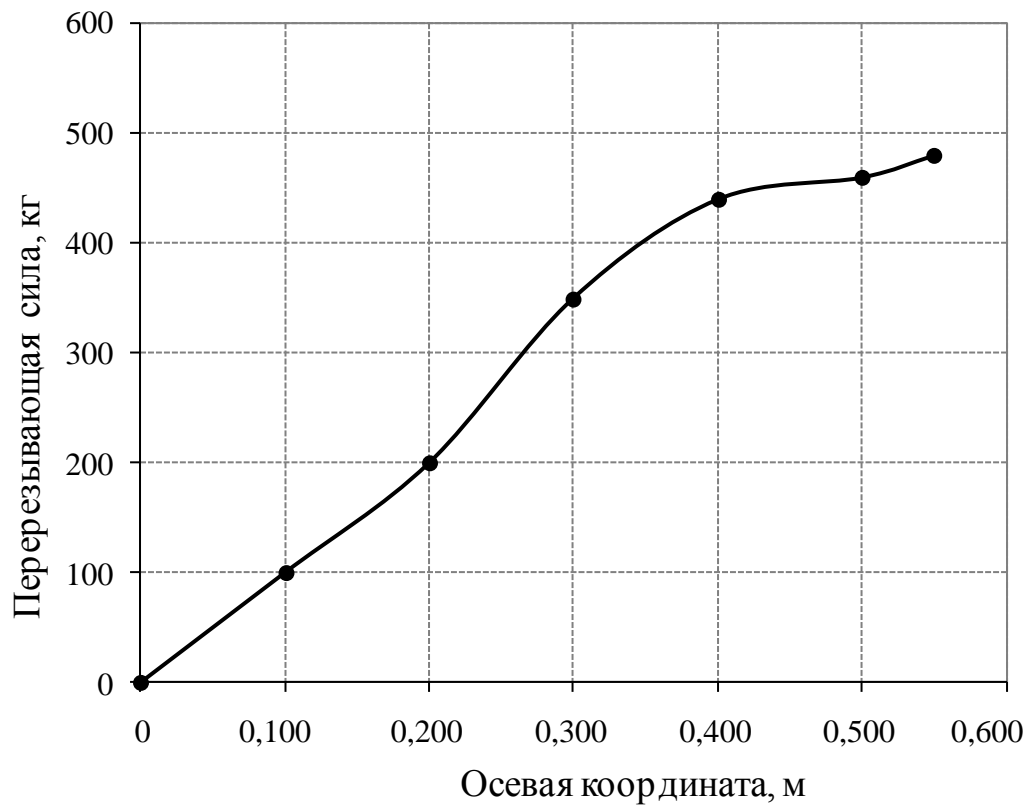


Рис. 4.4 Силовая нагрузка

Расчет НДС рассматриваемой конструкции при выбранных условиях нагружения был выполнен с помощью конечно-элементного пакета ANSYS, позволяющего связать в единую цепочку процессы вычисления температурных полей и НДС в среде Workbench. Расчетная геометрическая и конечно-элементные модели представлены на рис. 4.5.

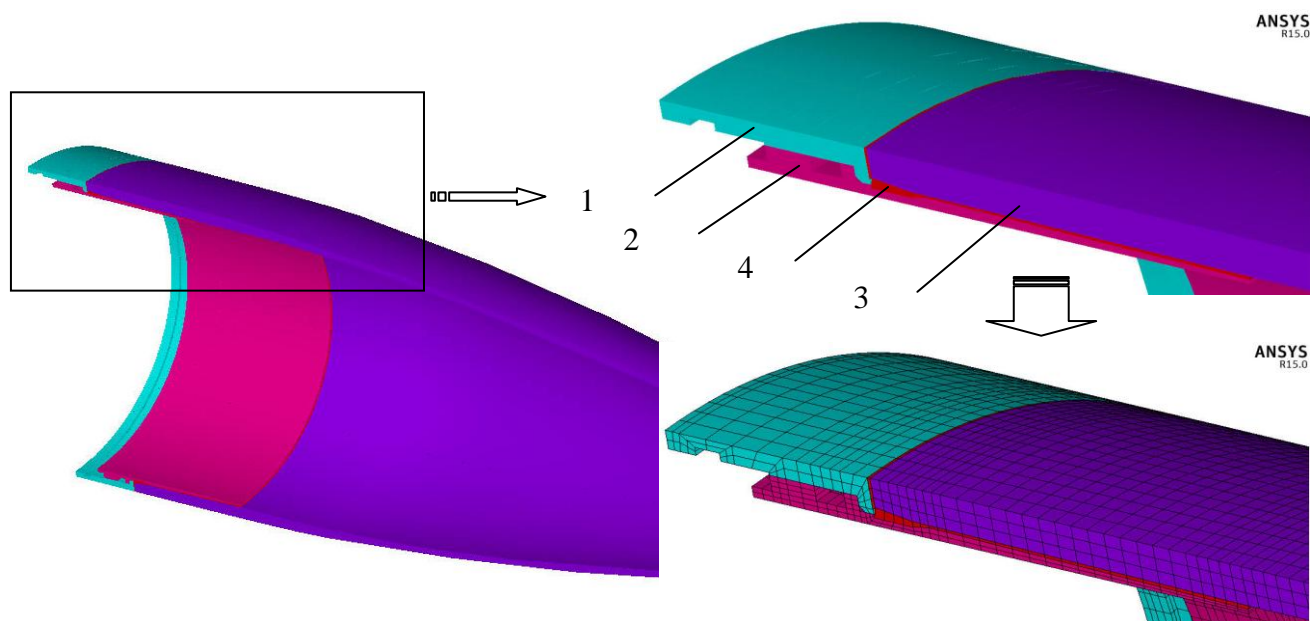


Рис. 4.5 Расчетная геометрическая и конечно-элементная модели (показана $\frac{1}{2}$ часть изделия).

В основу конструкции шпангоута заложены две металлические обечайки (1 и 2, см. рис. 4.5) с кольцевыми выступами, соединенные телескопически и зафиксированные радиальными штифтами, установленными по скользящей посадке. Обечайка шпангоута (3) из прецизионного инварового сплава соединена с внутренней поверхностью керамической оболочки эластичным клеом-герметиком (4). Наружная обечайка (1) из титанового сплава обеспечивает соединение изделия со вторым отсеком.

По заданным распределениям температуры наружной поверхности и силовым нагрузкам определены несколько временных точек на режиме работы изделия, характеризующихся максимальными уровнями растягивающих напряжений в керамической оболочке. Максимальные растягивающие напряжения в керамической оболочке от совместного воздействия температуры и изгибающе-

го момента, полученные в результате расчета НДС при номинальных значениях входных параметров модели, представлены на рис. 4.6.

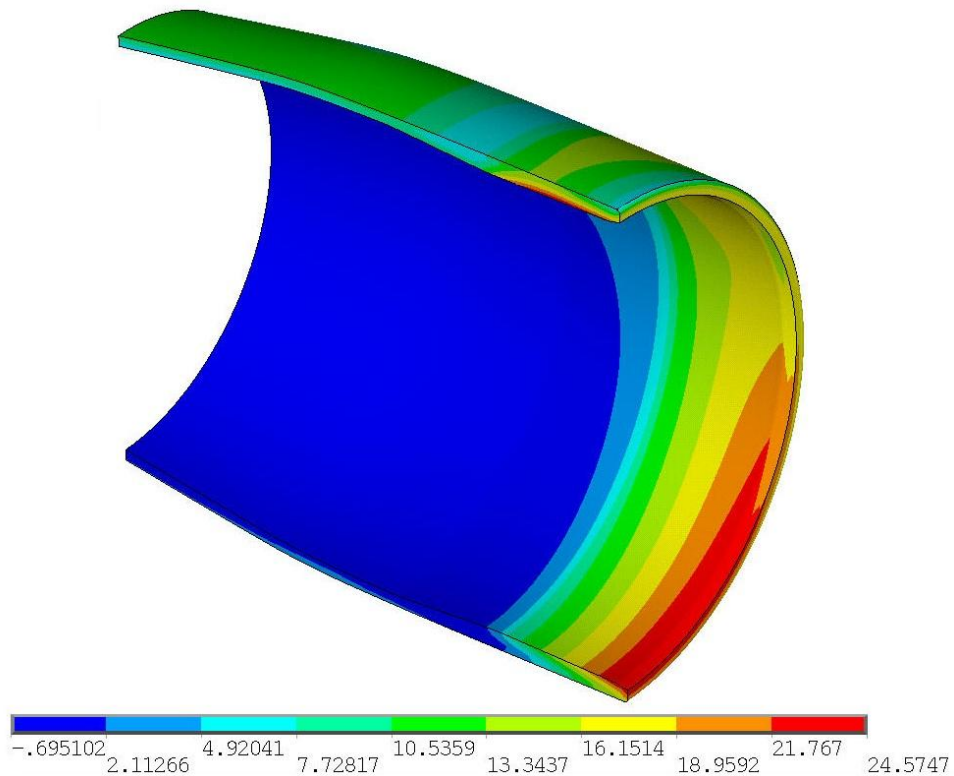


Рис. 4.6 Максимальные растягивающие напряжения в оболочке, МПа (Воздействие температуры и силового нагружения)

4.3. Оценка прочностной надежности элементов ЛА из керамических материалов с учетом изменчивости свойств конструкционных материалов и условий нагружения на основе метода Монте-Карло

Моделирование ММК обеспечивает наборы входных переменных для выполнения многократного детерминированного анализа системы (один результат анализа для уникального набора входных переменных), который сводится к детерминированному расчету максимальных напряжений, действующих в изделии в результате эксплуатационного нагружения (расчет НДС).

Суть ММК сводится к моделированию значения переменной y с известной функцией плотности распределения $f(y)$ как

$$y_i = f^{-1}(\xi), \quad (4.21)$$

где ξ – случайное значение из интервала (0; 1), выдаваемое генератором случайных чисел, $f^{-1}(\xi)$ – обратная функция к $f(y)$.

В качестве случайных переменных для нахождения функции распределения σ_{\max} были взяты:

1) физико-механические и теплофизические свойства ОТМ-357, ВИКСИНТ У2-28НТ, Инвар 32НКМБЛ и ВТ-20 с функциями нормального закона распределения с номинальными значениями в качестве математических ожиданий и 10% от номиналов – в качестве стандартных отклонений. Исключение составил коэффициент Пуассона ВИКСИНТ У2-28НТ, 10% вариация которого привела к физически не приемлемым результатам, поэтому для данного параметра был взят 2,5% интервал варьирования;

2) условия нагружения – температура теплового потока и перерезывающая сила – с функциями нормального закона распределения с номинальными значениями в качестве математических ожиданий и 10% от номиналов – в качестве стандартных отклонений.

Детерминированными параметрами модели являлись геометрия конструкции и уравнение внешнего контура оболочки. Кроме этого, характер температурных зависимостей свойств материалов и законов нагружения также оставался постоянным.

Для проведения 1000 расчетов σ_{\max} с целью оценки их функции распределения в автоматическом режиме написан соответствующий макрос [121]. На рис. 4.7 приведены результаты расчетов в виде эмпирического распределения σ_{\max} . Уставлено, что наиболее подходящей (уровень значимости критерия Колмогорова-Смирнова с поправкой Лиллиефорса $p > 0,70$) к экспериментальным данным является функция нормального закона распределения с параметрами 26,88 МПа (математическое ожидание) и 4,71 МПа (стандартное отклонение).

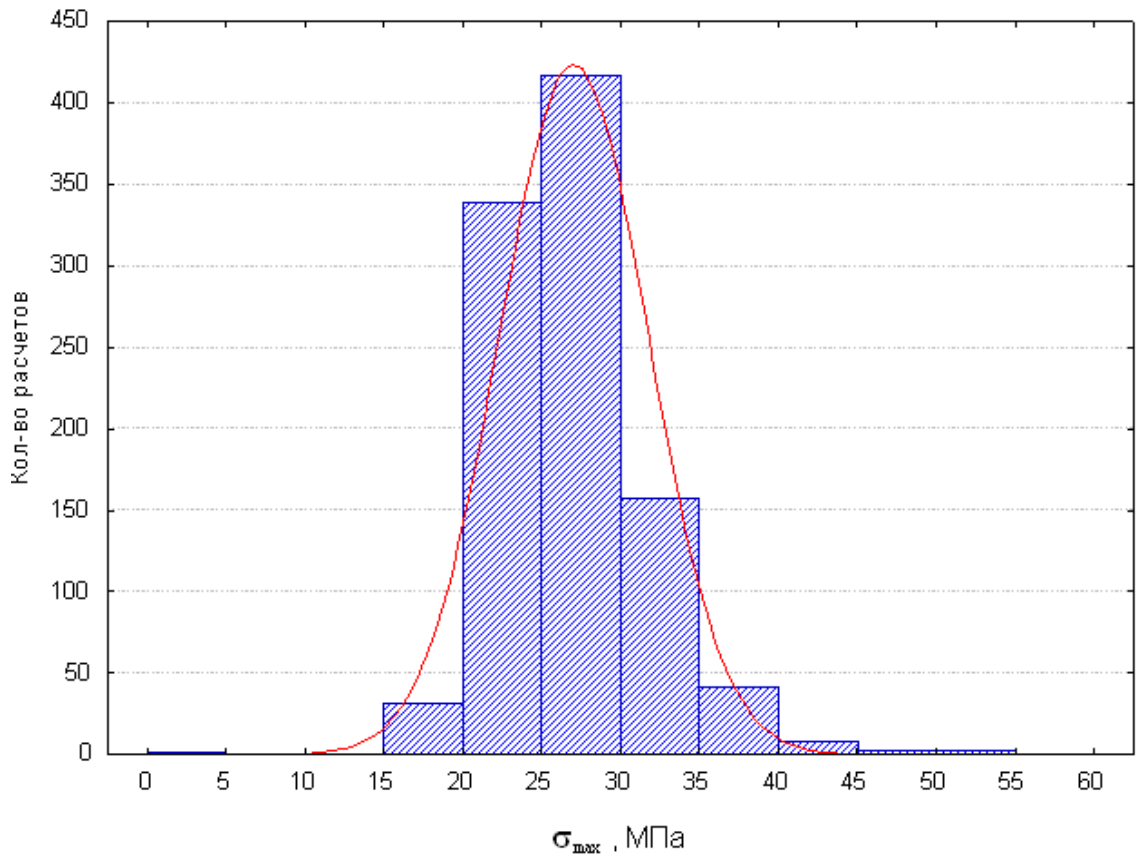


Рис. 4.7. Эмпирическая и теоретическая функции плотности распределения максимальных расчетных растягивающих напряжений

Используя полученную функцию нормального закона распределения σ_{\max} и распределение Вейбулла для предела прочности при растяжении $\bar{\sigma}_p$, надежность можно оценить по формуле (1.7), которая преобразуется к виду

$$\hat{R} = \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} S_{\sigma_{\max}}} \exp\left(-\frac{(\sigma_{\max} - \bar{\sigma}_{\max})^2}{2S_{\sigma_{\max}}^2}\right) \left[\int_{\sigma_{\max}}^{\infty} V_{ef} \frac{m}{\sigma_c} \left(\frac{\sigma}{\sigma_c}\right)^{m-1} \times \right. \\ \left. \times \exp\left(-V_{ef} \left(\frac{\sigma}{\sigma_c}\right)^m\right) d\sigma \right] d\sigma_{\max} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} S_{\sigma_{\max}}} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{(\sigma_{\max} - \bar{\sigma}_{\max})^2}{2S_{\sigma_{\max}}^2} - \right. \\ \left. - V_{ef} \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_c}\right)^m\right) d\sigma_{\max} \quad (4.22)$$

Интеграл в выражении (4.22) берется численно. Для нахождения доверительного интервала оценки надежности использовано следующее соотношение [122]:

$$\Delta R = \Phi^{-1}\left(\frac{1+\alpha}{2}\right)\sqrt{\frac{\hat{R}}{N(1-\hat{R})}}, \quad (4.23)$$

где α – доверительная вероятность.

Таким образом, найденная оценка прочностной надежности по уравнению (4.22) и 95%-ный доверительный интервал оценки приведены в табл. 4.6.

Оценка прочностной надежности по уравнению (4.22) получена с учетом модели хрупкого разрушения и стохастической природы свойств конструкционных материалов и условий нагружения и является наиболее физической обоснованной.

Таблица 4.6 – Оценки и 95%-ные доверительные интервалы оценок прочностной надежности

Метод оценки	R	ΔR
Norm + Weib (4.22)	0,995279	0,004269
Norm + Norm (4.24)	0,998776	0,002170
ММК (4.25)	0,994000	0,004782

Для сравнения в табл. 4.6 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

$$R = \Phi\left(\frac{\bar{\sigma}_p - \bar{\sigma}_{\max}}{\sqrt{S_{\sigma_p}^2 + S_{\sigma_{\max}}^2}}\right), \quad (4.24)$$

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

Кроме этого, была получена оценка прочностной надежности непосредственно с помощью ММК как

$$R = 1 - \frac{M}{N}, \quad (4.25)$$

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

Оценка прочностной надежности элементов ЛА с помощью моделирования по ММК легла в основу разработанной методики ПМ 596.1591-2004 «Оценка проектной надежности обтекателей», которая внедрена (Приложение В) и активно используется при оценке проектной надежности изделий НПК «РПО» ОАО «ОНПП «Технология».

4.4. Выбор оптимальных параметров элементов ЛА по критерию прочностной надежности

Моделирование ММК позволило найти функцию распределения максимальных расчетных напряжений с учетом неопределенностей входных параметров модели и оценить прочностную надежность через интеграл вероятности (1.7). Однако оно не позволяет количественно оценить чувствительность надежности к моделируемым неопределенностям. Коэффициенты чувствительности, как правило, вводятся через понятие индекса безопасности конструкции [43, 44, 123-125].

Для оценки прочностной надежности элементов ЛА с целью дальнейшего проведения анализа чувствительности использован метод оценки надежности первого порядка (First-Order Reliability Method – FORM) [42, 126-128].

В FORM оценка надежности определяется как

$$R = 1 - P_f = 1 - \int_{g(\bar{X}) \leq 0} \dots \int f_g(X) dX \approx \Phi(\beta), \quad (4.26)$$

где β – индекс безопасности, равный, по определению, числу стандартных отклонений предельной функции (4.1), укладываемых в интервале от $g(X)=0$ до среднего значения $g(X) = \bar{g}$,

$$\beta = \frac{\bar{g}}{S_g}. \quad (4.27)$$

Увеличение значения индекса безопасности приводит к возрастанию надежности (рис. 4.8).

Данный метод применяется в случае линейности функции предельного состояния и нормально распределенных переменных вектора X .

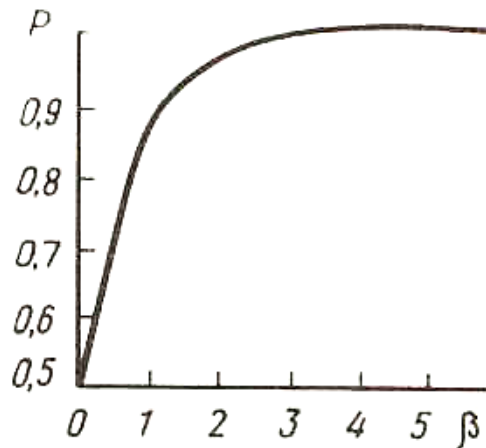


Рис. 4.8 Зависимость вероятности неразрушения от индекса безопасности

Линеаризация функции предельного состояния $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ выполняется путем разложения в ряд Тейлора в окрестности математического ожидания

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) \cong g(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) + \sum_{i=1}^n \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{\bar{x}} \cdot (x_i - \bar{x}_i). \quad (4.28)$$

Тогда

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

$$S_g = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{\bar{x}} \right)^2 \cdot S_{x_i}^2 + 2 \sum_{i < j} \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{\bar{x}} \left. \frac{\partial g}{\partial x_j} \right|_{\bar{x}} r_{ij} S_{x_i} S_{x_j}}, \quad (4.29)$$

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 ($r_{ij} = 0$ в случае отсутствия корреляции); $i, j = \overline{1, n}$.

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

$$u_i = \Phi^{-1}[F(x_i)], \quad i = \overline{1, n}, \quad (4.30)$$

где $F(x)$ – функция исходного распределения, $\Phi^{-1}(\cdot)$ – квантиль функции Лапласа.

Графически преобразование исходных переменных для трехмерного пространства представлено на рис. 4.9.

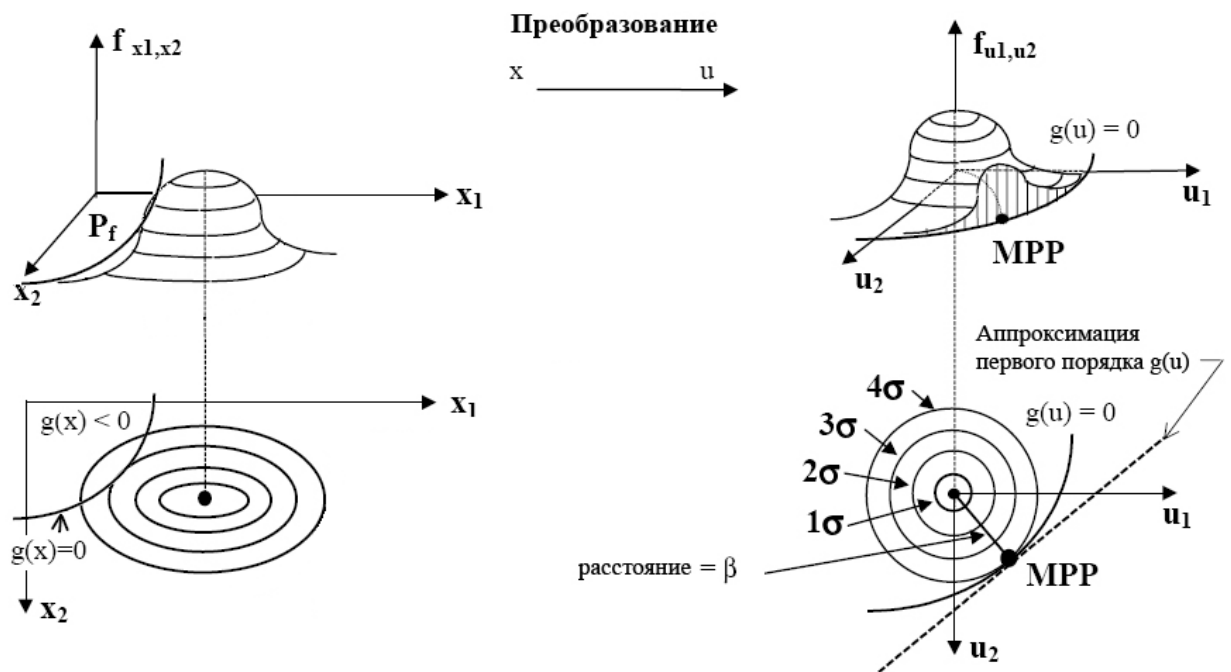


Рис. 4.9 Преобразование переменных (трехмерное пространство)

Оценка минимального уровня надежности R_{\min} , соответствующего заданной функции предельного состояния (4.1) и функциям распределения входных

параметров модели $F(x)$, находится путем решения задачи оптимизации, которая в факторном пространстве переменных U имеет вид:

$$\begin{cases} \beta = \min_U \|U\| \\ g(U) = 0 \end{cases} \quad (4.31)$$

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 (Most Probable Point – MPP).

В MPP функция плотности совместного распределения переменных на поверхности предельного состояния имеет самое высокое значение и вносит наибольший вклад в отказ [43, 125], т.е. это точка нахождения наихудшего варианта модели, обеспечивающего минимальный уровень надежности (рис. 4.9).

Для нахождения MPP используются различные методы, такие как гиперсферический метод, метод направляющих косинусов, поисковые методы, основанные на выборках, методы оптимизации и т.д. К сожалению, нет единого способа определения MPP в каждой конкретной ситуации. Недостатками многих методов являются отыскание локальных экстремумов на предельной поверхности, а также осцилляция между двумя экстремальными точками [129, 130].

В данной работе для решения задачи (4.31) использован метод, предложенный в [125] и основанный на информации о производной функции предельного состояния в направлении поиска и перемещении MPP от середины распределения к его хвостам. Как показано в [125] на примере решения двух задач, предложенный метод является эффективным и робастным для нахождения распределения выходного параметра системы, и хорошо согласуется с результатами ММК.

Алгоритм состоит из решения двух подзадач: определения MPP для дискретных значений индекса безопасности и определения исходного направления поиска. Первая задача решается следующей последовательностью шагов:

1. Определяется вектор, связанный с точкой u_k^i (текущая точка на β^i -сфере) и началом координат

$$d_k^i = u_k^i; \quad (4.32)$$

2. Если

$$\alpha_k^i = \cos^{-1} \left(\frac{d_k^i \cdot \nabla g(u_k^i)}{\|d_k^i\| \cdot \|\nabla g(u_k^i)\|} \right) \leq \varepsilon_\alpha, \quad (4.33)$$

где ε_α – малый угол, равный $0,1^\circ$ или 1° , то MPP найдена и $u_{MPP}^i = u_k^i$, иначе переход к шагу 3;

3. Устанавливается направление поиска, равное вектору между d_k^i и $\nabla g(u_k^i)$,

$$d_{k+1}^i = \frac{d_k^i}{\|d_k^i\|} + \frac{\nabla g(u_k^i)}{\|\nabla g(u_k^i)\|}; \quad (4.34)$$

4. Рассчитывается $(k + 1)$ -точка

$$u_{k+1}^i = \beta^i \frac{d_{k+1}^i}{\|d_{k+1}^i\|} \quad (3.35)$$

и выполняется шаг 2.

Таким образом, основная идея предложенной процедуры заключается в поиске точки на β -сфере, удовлетворяющей условию (4.33). Если это условие не выполняется, точка пересчитывается вдоль суммарного вектора между d_k^i и $\nabla g(u_k^i)$. Геометрическая интерпретация данного алгоритма показана на рис. 4.10.

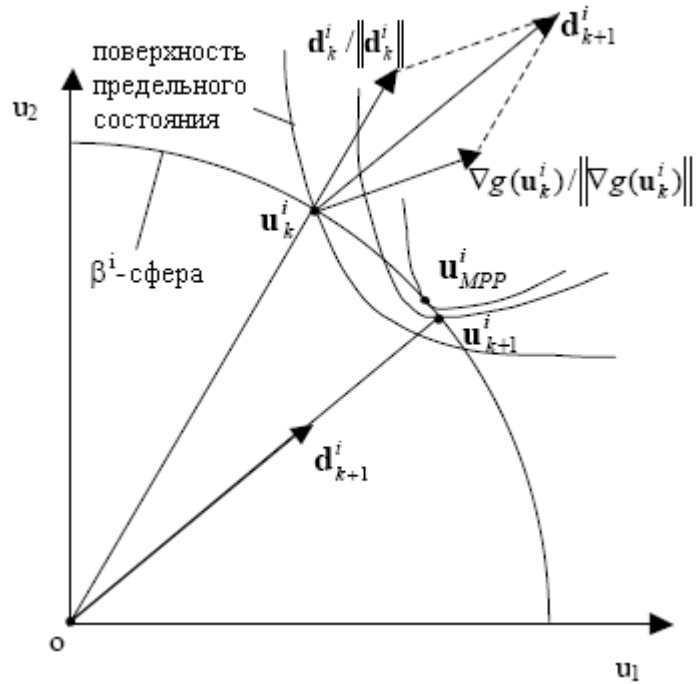


Рис. 4.10 Поиск MPP на β^i -сфере

Очевидно, что при выборе «удачной» начальной точки u_0^i , данный алгоритм будет сходиться достаточно быстро. В [125] предложено начальную точку поиска для больших значений β определять с помощью MPP, найденных для β -сфер меньшего радиуса.

Суть такого подхода геометрически изображена на рис. 4.11 и заключается в использовании полинома 2-го порядка, коэффициенты которого (a_{0j}, a_{1j}, a_{2j}) могут быть получены путем решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} u_{MPP}^{i-1} = a_{0j} + a_{1j}\beta^{i-1} + a_{2j}(\beta^{i-1})^2 \\ u_{MPP}^{i-2} = a_{0j} + a_{1j}\beta^{i-2} + a_{2j}(\beta^{i-2})^2 \\ u_{MPP}^{i-3} = a_{0j} + a_{1j}\beta^{i-3} + a_{2j}(\beta^{i-3})^2 \\ j = \overline{1, n} \end{cases} \quad (4.36)$$

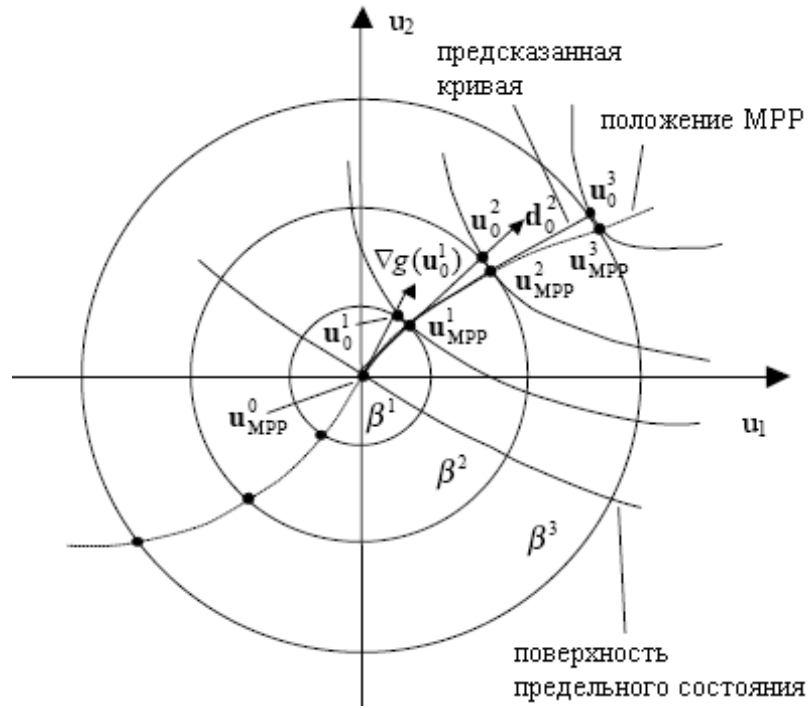


Рис. 4.11 Траектория положения MPP

Тогда начальная точка для поиска MPP на β^i -сфере определяется как

$$u_{0j}^i = a_{0j} + a_{1j}\beta^i + a_{2j}(\beta^i)^2, \quad j = \overline{1, n}. \quad (4.37)$$

Полученная в результате вышеприведенных расчетов дискретная функция предельных состояний использовалась для решения задачи (4.31) и нахождения наиболее вероятной точки MPP с помощью алгоритма (4.32)-(4.37). Оценка минимального индекса безопасности составила $\beta = 3,55$ и соответствующий ей минимальный уровень прочностной надежности по уравнению (4.26) – $R_{\min} = 0,999807$.

4.5. Анализ чувствительности индекса безопасности к изменчивости свойств конструкционных материалов и условий нагружения

Неотъемлемой и необходимой частью процесса моделирования неопределенностей является анализ чувствительности, цель которого состоит в оценке скорости изменения отклика модели на изменения входных переменных [112, 123, 131, 132]. Это важно знать для определения значимых параметров систе-

мы, наиболее сильно влияющих на ее выходные характеристики, а также для выяснения чувствительности системы к колебаниям этих параметров.

Информация о чувствительности выходных параметров к входным позволяет повысить надежность конструкции за счет снижения неопределенности или разброса значимо влияющих переменных.

При этом возможна ситуация, когда переменные, не имеющие существенного влияния как детерминированные, оказываются очень сильно влияющими на отклик в случае наличия у них большого разброса (неопределенности). Т.е. «слабые» переменные с большим разбросом могут иметь вероятностные факторы чувствительности более значимые, чем «сильные» переменные с небольшими стандартными отклонениями.

Переменные, не имеющие рассеяний (детерминированные) и приводящие к нулевому значению чувствительности, очевидно, не влияют на рассеяние самого отклика системы.

В общем случае коэффициенты чувствительности представляют собой производные индекса безопасности β по среднему значению \bar{x}_i и стандартному отклонению S_{x_i} входных случайных переменных x_i в наиболее вероятной точке X_{MPP} (соответствующей найденной U_{MPP}) и определяются следующим образом [43, 122, 123]

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial \bar{x}_i} \right|_{X_{MPP}} = \frac{\partial \beta}{\partial u_i} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial \bar{x}_i}, \quad (4.38)$$

$$\left. \frac{\partial \beta}{\partial S_{x_i}} \right|_{X_{MPP}} = \frac{\partial \beta}{\partial u_i} \frac{\partial u_i}{\partial S_{x_i}}. \quad (4.39)$$

Коэффициенты чувствительности, рассчитанные как производные по уравнению (4.38), позволяют оценить вклад среднего значения каждой переменной в значение β , коэффициенты чувствительности в уравнении (4.39) количественно выражают влияние неопределенностей входных переменных посредством их стандартных отклонений на индекс безопасности конструкции.

Соответствующие нормированные коэффициенты чувствительности $\varepsilon_{\bar{x}_i}$ и $\varepsilon_{S_{x_i}}$

имеют вид:

$$\varepsilon_{\bar{x}_i} = \frac{\bar{x}_i}{\beta} \cdot \frac{\partial \beta}{\partial \bar{x}_i} \Big|_{X_{MPP}} = -\frac{(u_i)_{MPP}}{\nu_{x_i}} \cdot \frac{1}{\beta^2} = -\frac{(x_{MPP i} - \bar{x}_i)}{\nu_{x_i}^2 \cdot \bar{x}_i} \cdot \frac{1}{\beta^2}, \quad (4.40)$$

$$\varepsilon_{S_{x_i}} = \frac{S_{x_i}}{\beta} \cdot \frac{\partial \beta}{\partial S_{x_i}} \Big|_{X_{MPP}} = -\frac{(u_i)_{MPP}^2}{\beta^2} = -\frac{(x_{MPP i} - \bar{x}_i)^2}{\nu_{x_i} \cdot \bar{x}_i} \cdot \frac{1}{\beta^2}, \quad (4.41)$$

$$-1 \leq \varepsilon_{\bar{x}_i}, \varepsilon_{S_{x_i}} \leq 1, \quad i = \overline{1, n},$$

где ν_{x_i} – коэффициент вариации x_i .

Диаграмма чувствительности приведена на рис. 4.12, на котором отдельными прямоугольниками выделены условия нагружения и свойства разных материалов, которые изображены в следующей последовательности: нагрузка – температура в сечениях 0,157м, 0,357м и 0,507м, перерезывающая сила; свойства – модули упругости, коэффициент температурного линейного расширения (КТЛР), коэффициенты Пуассона, коэффициенты теплопроводности и удельной теплоемкости стеклокерамики, герметика и материалов шпангоута и степени черноты стеклокерамики, инварового и титанового сплавов.

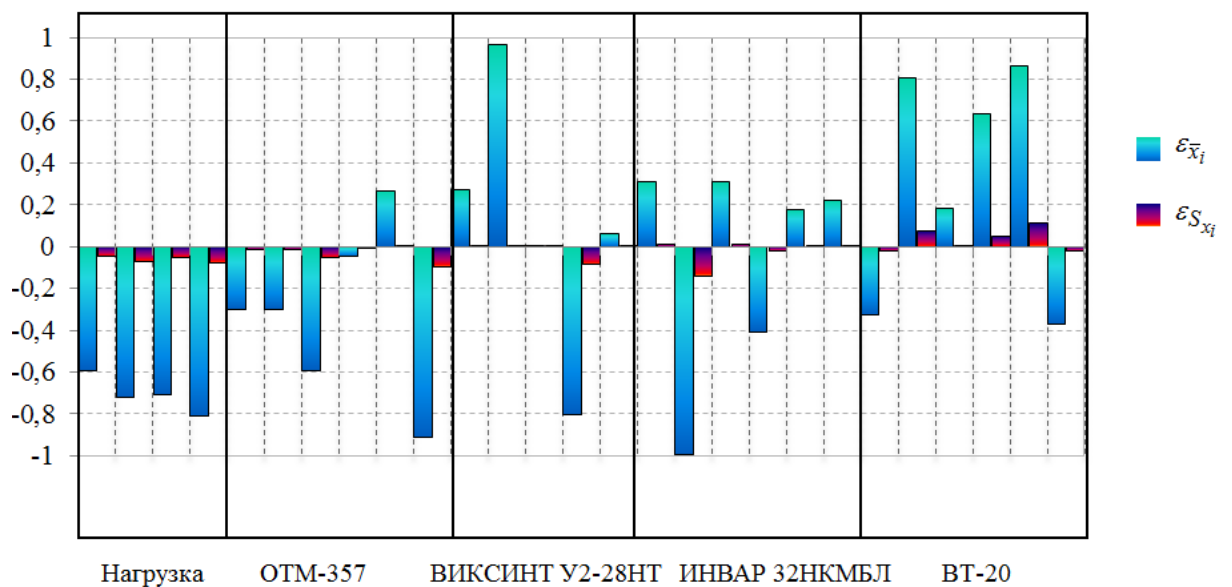


Рис. 4.12 Диаграмма чувствительности индекса безопасности к величине и рассеянию определяющих параметров модели

Как видно из представленного рисунка, наибольший вклад в повышение индекса безопасности вносят: удельная теплоемкость ОТМ-357; модуль упругости, коэффициент Пуассона и коэффициент теплопроводности ВИКСИНТ У2-28НТ; модули упругости, коэффициенты Пуассона, удельной теплоемкости и степень черноты ИНВАР 32НКМБЛ; КТЛР, коэффициенты Пуассона, коэффициенты теплопроводности и удельной теплоемкости ВТ-20. Неопределенности рассмотренных параметров на индексе безопасности сказываются незначительно – абсолютное значение максимального коэффициента чувствительности $\varepsilon_{S_{x_i}}$ составляет 0,136.

Работы по исследованию чувствительности оценок надежности к неопределенностям входных параметров модели необходимо продолжить в направлении варьирования геометрических параметров конструкции и ухода от принятых допущений относительно отсутствия парных корреляций и кругового рассеяния.

4.6. Основные этапы вероятностного подхода к оценке свойств материалов и разработке элементов ЛА

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. 4.13. В качестве случайных параметров, оказывающих влияние на НДС обтекателя, возникающее под воздействием приложенных нагрузок, выбраны физико-механические и теплофизические свойства материалов и условие нагружения.

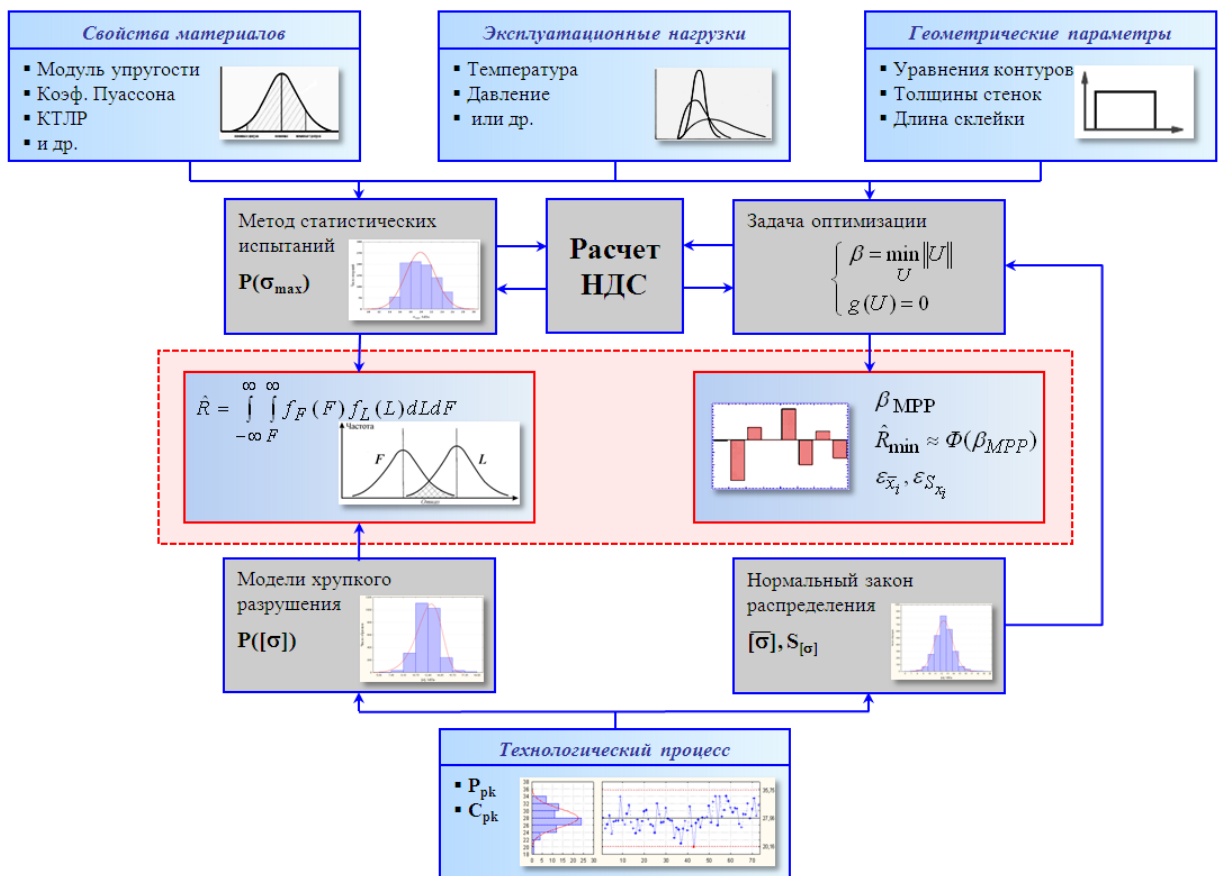


Рис. 4.13 Блок-схема прогнозирования эксплуатационного поведения элементов ЛА из керамических материалов с использованием предложенного вероятностного подхода

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.

4.7. Выводы и рекомендации

1. Проведен анализ и предложен алгоритм моделирования неопределенностей входных определяющих параметров конструкции элементов ЛА на основе метода Монте-Карло, позволяющий получить распределение и оценить параметры распределения максимальных расчетных напряжений, действующих в керамической оболочке в процессе эксплуатации.

2. С учетом полученного распределения максимальных расчетных напряжений и распределения прочности материала изделия найдены оценки и 95%-ные доверительные интервалы оценок прочностной надежности.

3. Разработана физико-статистическая модель и получены оценки надежности керамических изделий с учетом статистических неопределенностей физико-механических и теплофизических свойств материалов и эксплуатационных нагрузок, базирующаяся на понятии индекса безопасности.

4. Найдены значения индекса безопасности и минимального уровня надежности стеклокерамического изделия при нормальном распределении в 10%-ном интервале варьирования от номинала входных определяющих параметров конструкции изделия.

5. Построены диаграммы чувствительности индекса безопасности к значению и разбросу входных определяющих параметров. Выявлены параметры, оказывающие наибольшее влияние на надежность.

6. Сформулированы основные этапы вероятностного подхода к оценке свойств материалов и разработке элементов ЛА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационного исследования получены следующие основные результаты и сделаны выводы.

1. Подтверждена правомерность использования модели наислабейшего звена Вейбулла для исследования прочностных показателей двух исследуемых керамических 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов В. П., Обухович В. А., Сидоренко С. И., Широкоград А. Б. Энциклопедия современной военной техники. – М.: АСТ, Мн.: Харвей, 2001. – 720 с.
2. Широкоград А. Б. Энциклопедия отечественного ракетного вооружения. – М.: АСТ, Мн.: Харвей, 2003. – 544 с.
3. Голубев И. С., Самарин А. В. Проектирование конструкций летательных аппаратов: Учебник для студентов втузов. – М.: Машиностроение, 1991. – 512 с.
4. Проектирование зенитных управляемых ракет / Архангельский И. И., Афанасьев П. П., Болотов Е. Г. и др.; Под ред. Голубева И. С. и Светлова В. Г. – М.: Изд-во МАИ, 2001. – 732 с.
5. Русин М. Ю. Проектирование головных обтекателей ракет из керамических и композиционных материалов: уч. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 64 с.
6. Шаталин А. С., Ромашин А. Г. Керамика – материал XXI века // Наука производству. – 1999. – № 9. – С. 4-7.
7. Ромашин А. Г. Силикатные материалы в объектах новой техники // Труды международной научно-технической конференции. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева. – 2003. – С. 92-107.
8. Ромашин А. Г., Русин М. Ю. Проблемы и перспективы создания головных обтекателей летательных аппаратов из керамических и композиционных материалов // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: Сб. тезисов XVII науч.-техн. конф. – Обнинск. – 2004. – С. 7-13.
9. Суздальцев Е. И. Материалы антенных обтекателей. // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2006. – № 3. – С. 18-29.
10. Русин М. Ю., Антонов В. В., Ромашин В. Г. Научные-технические проблемы создания перспективных конструкционных материалов для обтека-

телей управляемых ракет // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: Сб. тезисов XIX Междунар. науч.-техн. конф. – Обнинск. – 2010. – С. 78-80.

11. Эванс А. Г., Лэнгдон Т. Г. Конструкционная керамика. Пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 342 с.

12. Dukes W. H. Handbook of Brittle Material Design Technology, AGARD-Dograph 152, AGARD, France, Paris, 1971.

13. Баринов С. М., Шевченко В. Я. Прочность технической керамики. – М.: Наука, 1996. – 159 с.

14. Бакунов В. С., Беляков А. В. К вопросу об анализе структуры керамики. // Неорганические материалы. – 1996. – Т. 32 – № 2. – С. 502-507.

15. Бакунов В. С., Беляков А. В. Влияние структуры керамики на ее прочность. // Неорганические материалы. – 2002. – Т. 38, – № 4. – С. 502-507.

16. Peterlik H. Relationship of Strengths and Defects of Ceramic Materials and Their Treatment by Weibull Theory // Journal Ceramic Soc. Japan. – 2001. – 109. – № 1272. – P. S121-S126.

17. Evans A. G., Johnson H. The Fracture Stress and its Dependence on Slow Crack Growth // Journal of Material Science. – 1975. – № 10. – P. 214-222.

18. Evans A. G., Fuller E. R. Crack Propagation in Ceramic Materials Under Cyclic Loading Conditions // Metallurgical Transactions, Jan. – 1974. – P. 27-33.

19. Johnson C. A. Fracture Statistics of Multiple Flaw Distributions. In Fracture Mechanics of Ceramics, Vol. 5. Surface Flaws, Statistics, and Microcracking. Edited by R.C. Bradt, A.G. Evans, D.P.H. Hasselman, and F.F. Lange. Plenum Press, New York. – 1983. – P. 365-386.

20. Келин Ю. И. Исследование по разработке материала и техпроцесса изготовления антенных обтекателей из корундовой керамики ракет класса «воздух-воздух»: Дис. канд. техн. наук. – М., 1975. – 207с.

21. Пивинский Ю. Е., Суздальцев Е. И. Кварцевая керамика и огнеупоры. Том 1. Теоретические основы и технологические процессы: Справочное издание. Под ред. Ю.Е. Пивинского. – М.: Теплоэнергетик, 2008. – 672 с.

22. Пивинский Ю. Е., Суздальцев Е. И. Кварцевая керамика и огнеупоры. Том 2. Материалы, их свойства и области применения: Справочное издание. Под ред. Ю.Е. Пивинского. – М.: Теплоэнергетик, 2008. – 464 с.

23. Богданова Г. С., Бондарев К. Т., Гурвиц Е. Ч. и др. Радиопрозрачный ситалл АС 370. Сб. «Новые неорганические материалы», Изд. АН СССР под ред. акад. Семенова Н. Н. – 1968. – С. 16-17.

24. Бессмертная З. Г., Богданова Г. С., Гурвиц Л. Г. и др. Радиопрозрачный термостойкий ситалл АС 418. Сб. «Новые неорганические материалы», Изд. АН СССР, выпуск 2. – 1972. – С. 12-13.

25. Суздальцев Е. И. Исследования по получению стеклокерамики β -сподуменового состава с регулируемой диэлектрической проницаемостью // Огнеупоры и техническая керамика. – 2002. – № 5. – С. 15-17.

26. Суздальцев Е. И. Синтез высокотермостойких, радиопрозрачных материалов и разработка технологии изготовления на их основе обтекателей летательных аппаратов: Дис. доктора технических наук. – М., РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2002. – 430с.

27. Суздальцев Е.И. Исследование прочностных и упругих свойств стеклокерамики литийалюмосиликатного состава // ИФЖ. – 2001. – Т. 74. № 6. – С. 131-135.

28. Суздальцев Е.И., Русин М.Ю., Левшанов В.С., Куракин В.И., Хамицаев А.С. Анализ соответствия прочности стеклокерамики ОТМ-357 требованиям к конструкции обтекателя // Огнеупоры и техническая керамика. – 2004, – № 7. – С. 9-12.

29. Суздальцев Е.И., Хамицаев А.С. К вопросу устойчивости стеклокерамики литийалюмосиликатного состава к воздействию эксплуатационных факторов летательных аппаратов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2005. – № 10. – С. 16-23.

30. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 1990-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1990.

31. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. Пер. с англ. Е.Г.Коваленко. – М.: Мир, 1980. –607 с.
32. Волков Л. И., Шишкевич А. М. Надежность летательных аппаратов. – М.: Высшая школа, 1975. – 296 с.
33. Животкевич И. Н., Смирнов А. П. Надежность технических изделий – М.: Институт испытаний и сертификации вооружений и военной техники, 2004. – 472 с.
34. Апполонов И.В., Северцев Н.А. Надежность невозстанавливаемых систем однократного применения. – М.: Машиностроение, 1977. – 212 с.
35. Волков Е. Б., Судаков Р. С., Сырицын Т. А. Основы теории надежности ракетных двигателей. – М.: Машиностроение, 1974. – 400 с.
36. Левшанов В. С., Кирюшина В. В., Русин М. Ю. Оценка проектной надежности антенных обтекателей летательных аппаратов. // Авиационно-космическая техника и технология (сб. ХАИ). – 2004. – № 3(11). – С. 5-10.
37. Тихонов В. И. Выбросы случайных процессов. – М.: Наука, 1970. – 392 с.
38. Кузнецов А. А. Надежность конструкций баллистических ракет: Учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1978. – 256 с.
39. Cornell C.A. Bounds on the Reliability of Structural Systems // Journal of the Structural Division, ASCE. – 1967. – V. 93.
40. Lind N. C. The Design of Structural Design Norms // Journal of Structural Mechanics. – 1973. – V. 1. – №. 3.
41. Torng T. Y., Wu Y.-T. and Millwater H. R. Structural System Reliability Calculation Using a Probabilistic Fault Tree Analysis Method // AIAA-92-2410-CP, 1992.
42. Ditlevsen O. and Madsen H. O. Structural Reliability Methods. Monograph. Technical University of Denmark. – 2005. – P. 363.
43. Wu Y.-T. Computational Methods for Efficient Structural Reliability and Reliability Sensitivity Analysis // AIAA Journal. – 1994. – V. 32. – № 8. – P. 1717-1723.

44. Hasofer A. M. and Lind N. C. An exact and invariant first-order reliability format // *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*. – 1974. – V. 100. – № EMJ. February. – P. 111-121.
45. Райзер В. Д. Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1986. – 192 с.
46. Теория надежности в строительном проектировании / Райзер В. Д. – М.: АСВ, 1998. – 304 с.
47. Кузнецов А. А., Золотов А. А., Комягин В. А., Титов М. И. Надежность механических частей конструкций летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1979. – 144 с.
48. Sunil S. Bhamare, Om Prakash Yadav, Ajay Rathore. Evolution of reliability engineering discipline over the last six decades: a comprehensive review // *International Journal of Reliability and Safety*. – 2007. – V 1, № 4. – PP. 377-410.
49. Long M. W., Narciso J. D. Probabilistic design methodology for composite aircraft structures. Report, 1999. – P. 138.
50. Review of the Probabilistic Failure Analysis Methodology and Other Probabilistic Approaches for Application in Aerospace Structural Design. Technical Paper. NASA Marshall Space Flight Center, 1993.
51. Ushakov A., Kuznetsov A. A., Stewart A. and Mishulin I. B. Probabilistic Design of Damage Tolerant Composite Aircraft Structures. Final Report under Annex 1 to Memorandum of Cooperation AIA/CA-71 between the FAA and Central Aero Hydrodynamic Institute (TsAGI), 1996.
52. Греченев В. И. Обеспечение надежности головных радиопрозрачных обтекателей технологическими методами // Сб. «Антенные обтекатели и антенные укрытия». – Обнинск: ОНПО «Технология». – 1985. – Ч. II, – С. 64-65.
53. Греченев В. И., Чуриков В. И. и др. Влияние факторов наземной эксплуатации на надежность головных радиопрозрачных обтекателей // Сб. «Антенные обтекатели и антенные укрытия». – Обнинск: ОНПО «Технология». – 1985. – Ч. II, – С. 91.

54. Греченев В. И., Зоткина С. Е., Ромашин В. Г. Зависимость эксплуатационных свойств головных радиопрозрачных обтекателей от параметров технологического процесса // Сб. «Антенные обтекатели и антенные укрытия». – Обнинск: ОНПО «Технология». – 1985. – Ч. II, – С. 92.
55. Красулин Ю. Л., Тимофеев В. Н., Баринов С. М. и др. Пористая конструкционная керамика. – М.: Металлургия, 1980. – 100 с.
56. Фрейденталь А. М. Статистический подход к хрупкому разрушению. В сб. Разрушение. Том 2. Математические основы теории разрушения. Под ред. А. Ю. Ишлинского. – М.: Мир, 1975. – 764 с.
57. Витицкий П.М., Попина С.Ю. Прочность и критерии хрупкого разрушения дефектных тел. – Киев: Наукова думка, 1980. – 187 с.
58. Болотин В. В. Статистические методы в строительной механике. – М.: Стройиздат, 1965. – 279 с.
59. Болотин В. В. О прогнозировании надежности и долговечности машин // Машиноведение. – 1977. – № 5. – С. 86-93.
60. Jajatilaka A., Trustrum K. Statistical approach to brittle fracture // Journal Materials Sciences. – 1977. – V. 12. – № 8. – P. 1426-1432.
61. Trantina G. G., De Lorenzi H. G. Design Methodology for Ceramic Structures. Труды американского общества инженеров-механиков. Серия «Энергетические машины и установки». – М.: Мир, 1977. – № 4. – С. 69-77.
62. Quinn G.D., Morrell R. Design Data for Engineering Ceramics: A Review of the Flexure Test // Journal of American Ceramic Society. – 1991. – V. 74. – № 9. – P. 2037-2066.
63. Ambrožič M., Vidovič K. Reliability of the Weibull analysis of the strength of construction materials // Journal of Materials Science. – 2007. – № 42. – P. 9645-9653.
64. Gorjan L., Ambrožič M. Bend strength of alumina ceramics: A comparison of Weibull statistics with other statistics based on very large experimental data set // Journal of the European Ceramic Society. – 2012. V. 32. – № 6. – P. 1221-1227.

65. Danzer R. Some notes on the correlation between fracture and defect statistics: Are Weibull statistics valid for very small specimens // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2006. – V. 26. – № 15. – P. 3043-304.
66. Hegedusova L., Ceniga L., Dusza J. Bending and contact strength of monolithic ceramic materials // *International Journal of Damage Mechanics*. – 2012. V. 21. – № 2. – P. 293-305.
67. Khalili A., Peterlik H., Dusza J., Kromp K. Quantative Correlation Between the Distribution of Pore Lengths and the Strength of Porous Silicon Carbide // *Proc. Intern. Conf. «Fractography'94»*. Bratislava: Polygraphic SAV. – 1994. – P. 72-83.
68. Hayashi S., Suzuki A. Bending Fracture Strength of Sintered Silicon Nitride Discs with Shoulder Fillet at Room Temperature // *Fracture Mechanical Ceramics*. – 1992. – V. 10. – P. 247-260.
69. McClintock F. A. Statistics of Brittle Fracture // *Fracture Mechanics of Ceramics*. Vol. 1. Bradt R.C., Hasselman D.P.H., and Lange F.F. Plenum, New York-London, 1974. – P. 93-116.
70. Batdorf S. B. and Crose J. G. A Statistical Theory for the Fracture of Brittle Structures Subjected to Nonuniform Polyaxial Stresses // *Journal Appl. Mech.* – 1974. – V. 41. – № 2. – P. 459-464.
71. Paul B. and Mirandy L. An improved Fracture Criterion for Three-Dimensional Stress States // *Journal Engineering Material Technology*. – 1976. – V. 98. – № 2. – P. 159-163.
72. Giovan M. N. and Sines G. Biaxial and Uniaxial Data for Statistical Comparison of a Ceramic's Strength // *Journal American Ceramic Society*. – 1979. – V. 62. – № 9. – P. 510-515.
73. Petrovic J. J. and Stout M. G. Multiaxial Loading Fracture of Al₂O₃ Tubes: II, Weibull Theory and Analysis // *Journal American Ceramic Society*. – 1984. – V. 67. – № 1. – P. 14-23.
74. Palaniswamy K. and Knauss W. G. On the Problem of Crack Extension in Brittle Solids Under General Loading / *Mech. Today*. – 1978. – V. 4. – P. 87-148.

75. Shetty D. K. Mixed-Mode Fracture Criteria for Reliability Analysis and Design with Structural Ceramics // *Journal Engineering Gas Turbines Power*. – 1987. – V. 109. – № 3. – P. 282-289.

76. Михайловский Э. М. К определению предела прочности хрупких материалов при растяжении // *Проблемы прочности*. – 1976. – № 11. – С. 53-56.

77. Bermejo R., Supanic P., Danzer R. Influence of measurement uncertainties on the determination on the Weibull distribution // *Journal of The European Ceramic Society*. – 2012. – V. 32. – № 2. – P. 251-255.

78. Mohammad A. Al-Fqwzan. Methods for Estimating the Parameters of the Weibull Distribution. – 2000. www.weibull.com.

79. 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.

80. Левшанов В. С., Фетисов В. С., Кирюшина В. В., Веревка 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.

81. Бородай Ф. Я., Трифонова З. Ф., Суздальцев Е. И. Влияние масштабного фактора на прочность кварцевой керамики. Статистическое распределение прочности и модуля упругости // В сб. «Жаропрочные неорганические материалы». – М.: ОНТИ НИТС, 1974. – С. 128-137.

82. Гогоци Г. А., Неговский А. Н. Влияние структурных факторов на эффективность оценки механических характеристик керамики и огнеупоров активными акустическими методами // *Огнеупоры*. – 1988. – №2. – С. 10-15.

83. Фетисов В. С., Левшанов В. С., Кирюшина В. В., Веревка В. Г. Исследование прочности при растяжении керамики на основе SiO_2 // *Наука и технологии: Труды XXVI Российской школы*. – М.: РАН, 2006. – Т. 1. – С. 98-107.

84. Левшанов В. С., Фетисов В. С., Кирюшина В. В., Веревка В. Г. К вопросу об оценке прочности при растяжении кварцевой керамики и стеклокера-

мики // XXVI Российская школа по проблемам науки и технологий. Краткие сообщения. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – С. 39-44.

85. Фетисов В. С., Прасолов А. Н., Левшанов В. С., Кирюшина В. В. Оценка прочности при растяжении керамики на основе SiO_2 // Деформация и разрушение: Сб. статей по матер. Первой междунар. конф. – М.: ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН. – 2006. – С. 387-390.

86. Кирюшина В. В., Левшанов В. С., Фетисов В. С. Русин М. Ю. Оценка допустимого уровня прочности керамического материала при аттестации антенных обтекателей летательных аппаратов // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2011. – № 12. – С. 27-31.

87. Суздальцев Е. И., Сосулина А. П. Анализ и систематика дефектов, инициирующих снижение механической прочности стеклокерамики β -сподуменового состава // Новые огнеупоры. – 2003. – № 12. – С. 38-42.

88. Суздальцев Е. И., Харитонов Д. В., Сулова М. А., Ипатова Н. И. Исследование однородности крупногабаритных сложнопрофильных заготовок, отформованных шликерным литьем из шликеров литийалюмосиликатного стекла // Огнеупоры и техническая керамика. – 2004. – № 10. – С. 18-25.

89. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.

90. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985.

91. Левшанов В. С., Кирюшина В. В., Фетисов В. С. Влияние дефектности структуры материалов на вероятность разрушения керамических оболочек // XVII Петербургские чтения по проблемам прочности: Сб. матер. – Санкт-Петербург. – 2007. – Ч. I. – С. 232-235.

92. V. S. Levshanov, V. V. Kirjushina, V. S. Fetisov, M. Yu. Rusin The Weakest-Link Models in the Strength and Reliability Analysis of the Rocket Fairing Shell Made of Glass Ceramics // 2nd European Conference for Aerospace Sciences (EU-

CASS): Session 4.01 Structural Analysis and Optimization. 4.SP.38 – Brussels, Belgium, 2007.

93. Левшанов В. С., Кирюшина В. В., Фетисов В. С. Статистика прочности и дефекты структуры стеклокерамики // Деформация и разрушение материалов. – 2006. – № 11. – С. 40-45.

94. Barinov S. M., Shevchenko V. Ya. McClintock's Statistic and Strength Safety Factors for Ceramics // Fracture Mechanical Ceramics. – 1992. – V. 10. – P. 343-348.

95. Электронный учебник по статистике. StatSoft, Inc. – М.: StatSoft. – 2001. <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>.

96. Левшанов В. С., Русин М. Ю., Фетисов В. С., Кирюшина В. В. К вопросу достаточности сплошного метода контрольных испытаний на основе модели хрупкого разрушения // Композиционные материалы в промышленности: Матер. 25 Юбилейной междунар. конф. – Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология». – 2005. – С. 90-95.

97. 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.

98. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов. Том II. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 С.

99. Klir G. J. The Many Faces of Uncertainty. In B. M Ayyub and M. M. Gupta, editors, Uncertainty Modeling and Analysis: Theory and Applications, Elsevier Science. – 1994. – P. 3-19.

100. Баринов С. М., Кирюшина В. В., Левшанов В. С., Фетисов В. С., Вережка В. Г. Исследование замедленного разрушения и прогнозирование долговечности керамики на основе SiO_2 // Физика прочности и пластичности материалов: Сб. тезисов XVII Междунар. конф. / отв. ред. Штеренберг А. М. – Самара: Самарский гос. тех. ун-т. – 2009. – С. 269-270.

101. 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.

102. Моисеев Ю. А., Челышев С. В. Технологическая надежность сложного изделия и ее отработка. – М.: Едиториал УРСС. – 2003. – 176 с.

103. Чекмарев В. Н., Барвинок В. А., Шалавин В. В. Статистические методы управления качеством. – М.: Машиностроение, 1999. – 320 с.

104. Левшанов В. С., Русин М. Ю. Статистический анализ технологического процесса изготовления керамических оболочек // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: Сб. тезисов XVI науч.-техн. конф. – Обнинск. – 2001. – С. 41-43.

105. Ромашин А. Г., Суздальцев Е. И., Русин М. Ю. Научные и практические аспекты изготовления крупногабаритных, сложнопрофильных изделий из кварцевой керамики. Часть I. Статистический анализ устойчивости технологического процесса изготовления изделий из кварцевой керамики // Новые огнеупоры. – 2004. – № 9. – С. 34-40.

106. Ромашин А. Г., Суздальцев Е. И., Русин М. Ю. Научные и практические аспекты изготовления крупногабаритных, сложнопрофильных изделий из кварцевой керамики. Часть II. Анализ взаимосвязи уровня свойств технологических параметров с качеством изделий из кварцевой керамики // Новые огнеупоры. – 2004. – № 11. – С. 20-.

107. Русин М. Ю., Кирюшина В. В., Бородай Ф. Я., Левшанов В. С., Фетисов В. С. К вопросу о стабильности технологии производства изделий из кварцевой керамики. // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов (ТПКММ): Труды 4-й междунар. конф. – М.: Знание, 2006. – С. 435-439.

108. Суздальцев Е. И. Статистический анализ технологического процесса изготовления изделий из стеклокерамики литийалюмосиликатного состава // Огнеупоры и техническая керамика. – 2004. – № 3. – С. 12-18.

109. Статистические методы повышения качества / Под ред. Хитоси Кумэ. М., Финансы и статистика, 1990. – 304 с.
110. ГОСТ – Введ. 1999-04-15. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 32 с.
111. ГОСТ Р– Введ. 2010-11-12. – М.: Изд-во стандартов, 2010. – 23 с.
112. Haldar A., Mahadevan S. Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design. – New York: John Wiley & Sons, Inc. – 2000. – P. 304.
113. Nikolaidis, E. Types of Uncertainty in Design Decision Making. Engineering Design Reliability Handbook / Nikolaidis, E., Ghiocel, D. M., and Singhal, S. eds. – New York: CRC Press. – 2005.
114. Zhang X.L., Huang H.Z., Wang Z.L., Xiao N.C., Li Y.F. Uncertainty analysis method based on the combination of maximum entropy principle and point estimation method // Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability. – 2012. – V. 14. – № 2. PP. 114-119.
115. Helton J. C. and Davis F. J. Latin Hypercube Sampling and the Propagation of Uncertainty in Analyses of Complex Systems. Report of Sandia National Laboratories. USA. – 2002. – P. 135.
116. Fishman G. S. Monte Carlo: Concepts, Algorithms, and Applications. Springer Verlag, New York. – 1996.
117. Липовцев Ю. В., Русин М. Ю., Хамицаев А. С. Расчет и проектирование составных оболочечных конструкций: уч. пособие. – Обнинск: ОГТУ ИАТЭ, 2003. – 76 с.
118. Тимошенко С. П. Курс теории упругости / Под ред. Григолюка Э. И. – Киев: Наук. думка, 1972. – 501 с.
119. Строительная механика летательных аппаратов: Учебник для авиационных специальностей вузов / Образцов И. Ф., Булычев Л. А., Васильев В. В. и др.; Под ред. Образцова И. Ф. – М.: Машиностроение, 1986. – 536 с.
120. Гольденблат И. И., Копнов В. А. Критерий прочности и пластичности конструкционных материалов. – М.: Машиностроение, 1966. – 455 с.

121. Haldar A, Mahadevan S. Reliability Assessment Using Stochastic Finite Element Analysis. – New York: John Wiley & Sons, Inc., – 2000.

122. Ang H.-S., Tang W. H. Probability Concepts in Engineering Planning and Design. 2: Decision, Risk & Reliability. – New York: John Wiley & Sons, Inc. – 1975.

123. Koda M., McRae G. J., and Seinfeld J. H. Automatic Sensitivity Analysis of Kinetic Mechanisms // International Journal of Chemical Kinetics. – 1979. – № 11. – PP. 427-444.

124. McRae G. J., Tilden J. W., and Seinfeld J. H. Global Sensitivity Analysis – a Computational Implementation of the Fourier Amplitude Sensitivity Test (FAST) // Computers and Chemical Engineering. – 1982. – V. 1. – № 6. – PP. 15-25.

125. Du X., Chen W. A Most Probable Point-Based Method for Efficient Uncertainty Analysis // Design Manufacturing. – 2001. – V. 1. – № 4. – PP. 47-66.

126. X Du. Unified Uncertainty Analysis by the First Order Reliability Method // Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME. – 2008. – V. 9. – № 130. – PP. 091401-091410.

127. Cizelj L., Mavko B., Riesch-Oppermann H. Application of First and Second Order Reliability Methods in the Safety Assessment of Cracked Steam Generator Tubing // Nuclear Engineering & Design. – 1994. – V. 3. – № 147. – PP. 359–368.

128. Lu R., Luo Y., Conte J. P. Reliability Evaluation of Reinforced Concrete Beam. Structural Safety. – 1994. – № 14. – PP. 277-298.

129. Wang Z.L., Huang H.Z., Liu Y. A unified framework for integrated optimization under uncertainty // Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME. – 2010. – V. 132. – № 5. – PP. 051008-1-051008-8.

130. Du X. Efficient Methods for Engineering Design under Uncertainty, Ph. D. Thesis, University of Illinois at Chicago. – Chicago, IL, 2002.

131. Xiao N.-C., Huang H.-Z., Wang Z., Pang Y., He L. Reliability sensitivity analysis for structural systems in interval probability form. Structural and Multidisciplinary Optimization // School of Mechatronics Engineering, University of Electronic

Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan, China. – 2011. – V. 44. – № 5. – PP. 691-705.

132. Wang Z., Huang H. Z., Du X. Optimal design accounting for reliability, maintenance, and warranty // Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME. – 2010. – V. 132. – № 1. – PP. 011007-1-011007-8.

ПРИЛОЖЕНИЯ

УТВЕРЖДАЮ

И.В. Зам. генерального директора по научно-
производственной деятельности



ОАО «ОНПП «Технология»

Хмельницкий А.К.

2014 г.

Акт научно-технического внедрения

Настоящим актом подтверждаем, что разработанная в отделе 11 методика ПМ 596.1755-2014 «Оценка назначенного ресурса и срока службы антенных обтекателей летательных аппаратов», внедрена в производственную деятельность отдела 11 и используется для расчетов назначенного ресурса и срока службы (показатели надежности) изделий ОТИ 742, ОТИ 1111, ОТИ 1165, ОТИ 1450 и др.

Цель внедрения: оценка назначенного ресурса и срока службы антенных обтекателей из конструкционной керамики и стеклопластиков на стадиях проектирования, подтверждение расчетным путем заданных в техническом задании требуемых назначенного ресурса и срока службы, подготовка технической документации для Заказчика.

Разработчик программного обеспечения: Кирюшина В.В., математик 2 кат. отдела 11.

Начальник отдела 11

Воробьев С. Б.

СОГЛАСОВАНО:

Ученый секретарь

Келина И. Ю.

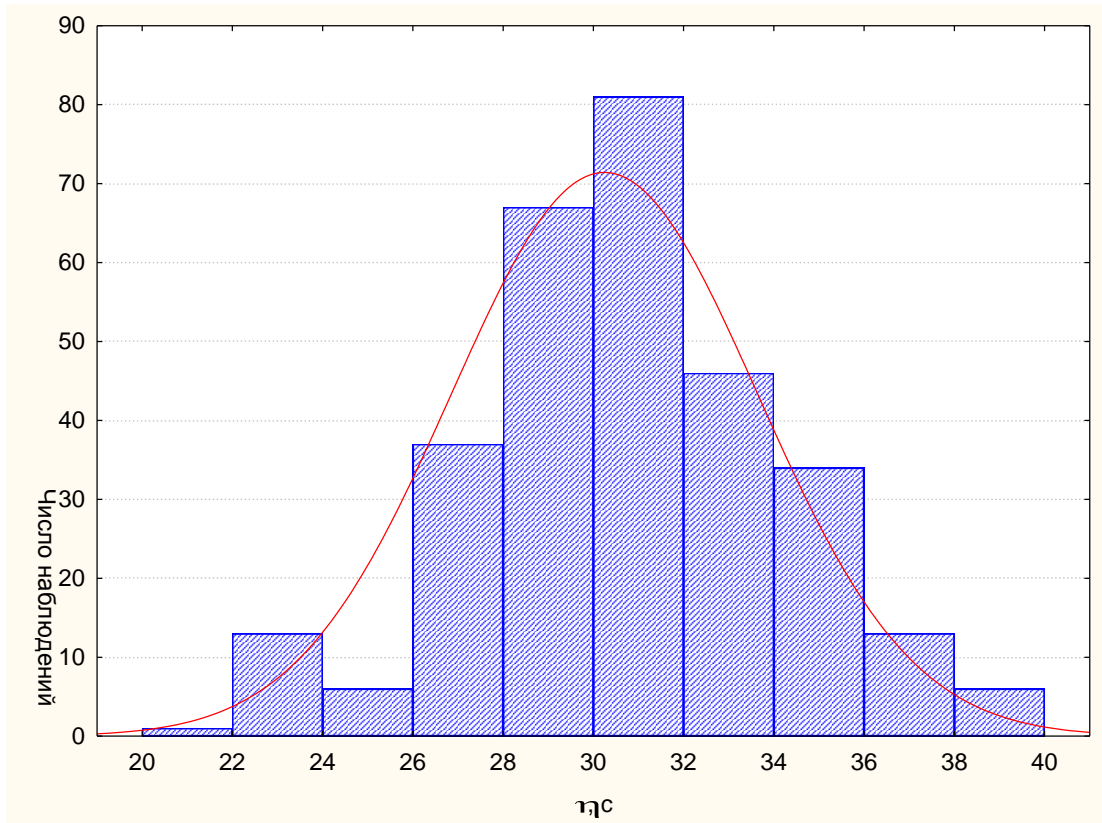


Рис. Б.1 Гистограмма вязкости шликера для формования заготовок изделия ОТИ 395

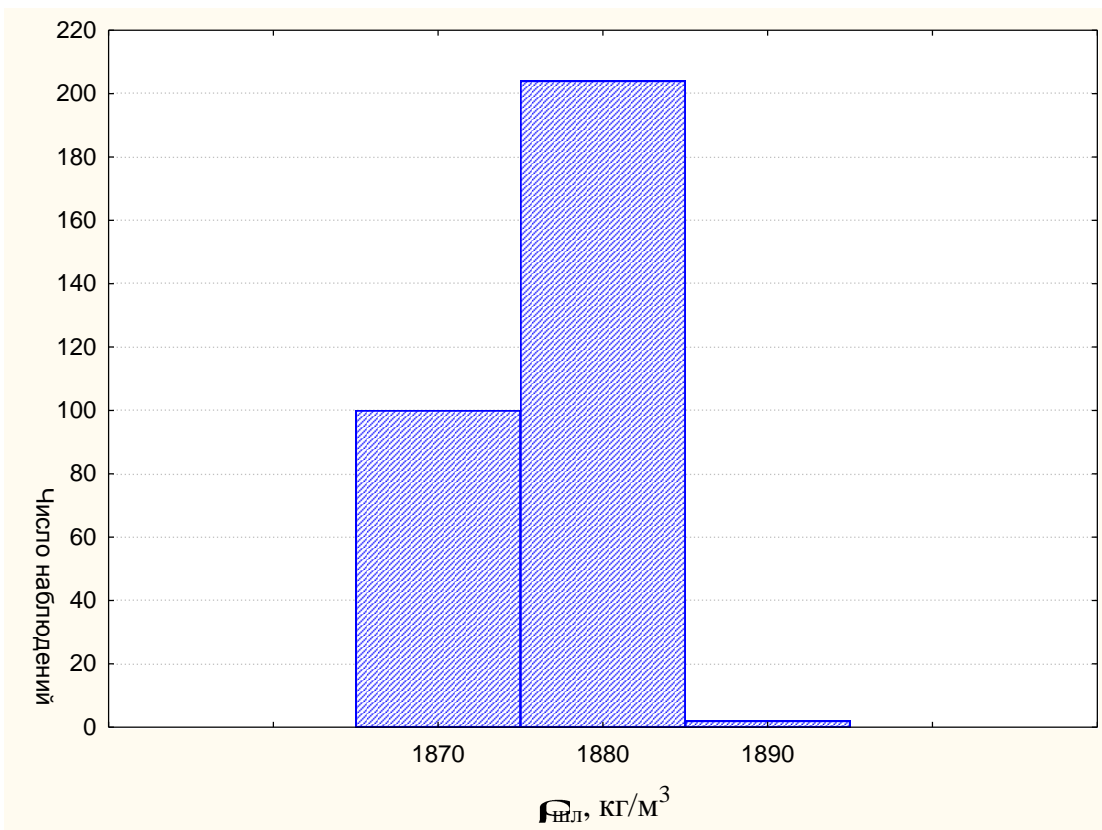


Рис. Б.2 Гистограмма плотности шликера для формования заготовок изделия ОТИ 395

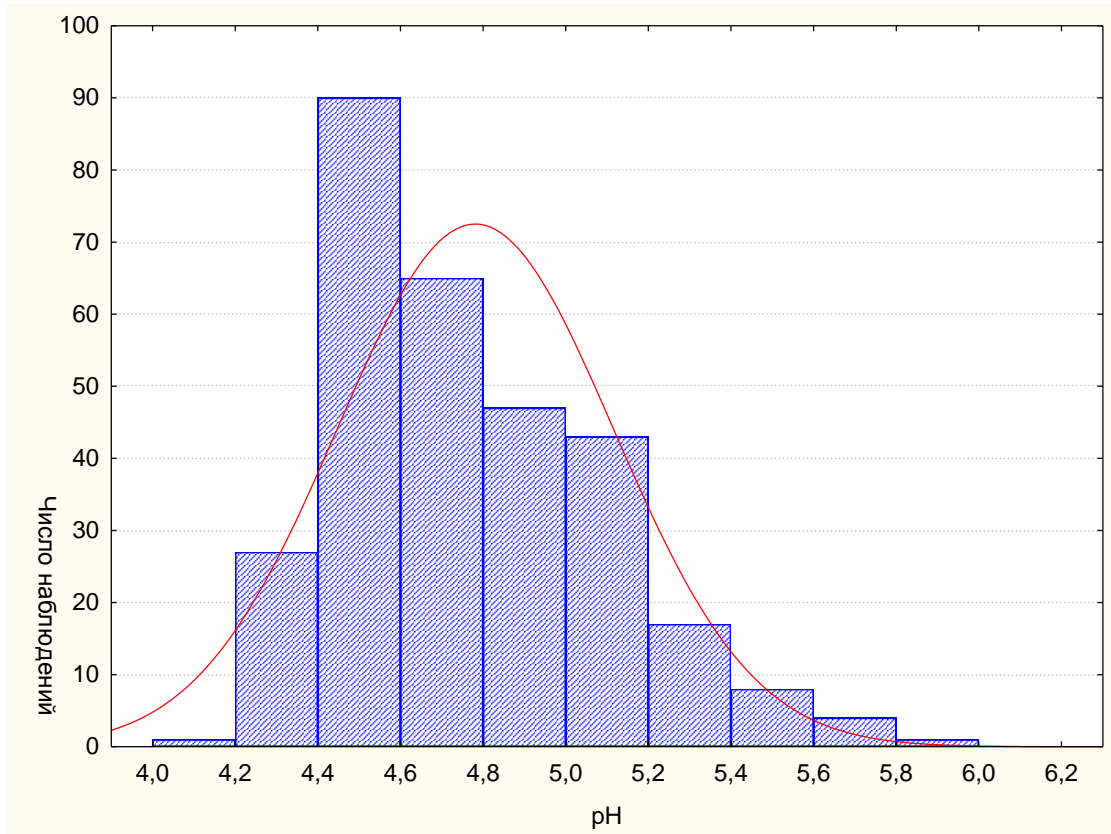


Рис. Б.3 Гистограмма pH шликера для формования заготовок изделия ОТИ 395

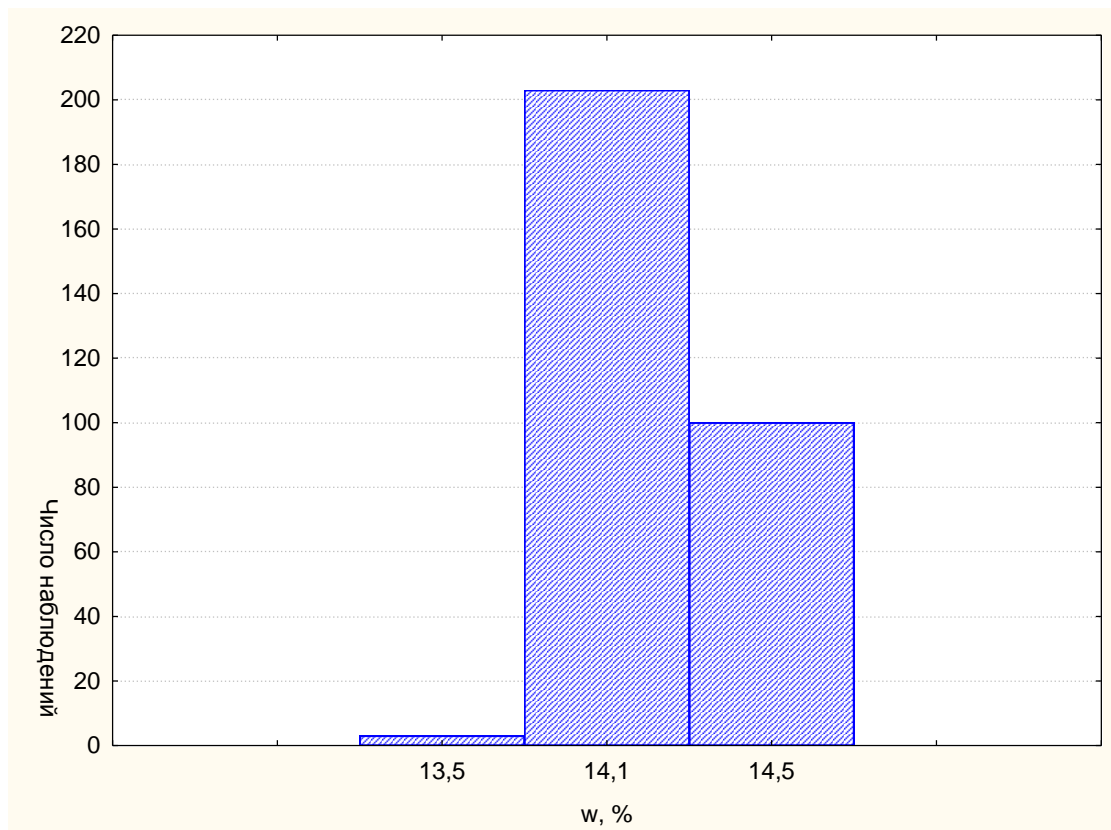


Рис. Б.4 Гистограмма влажности шликера для формования заготовок изделия ОТИ 395

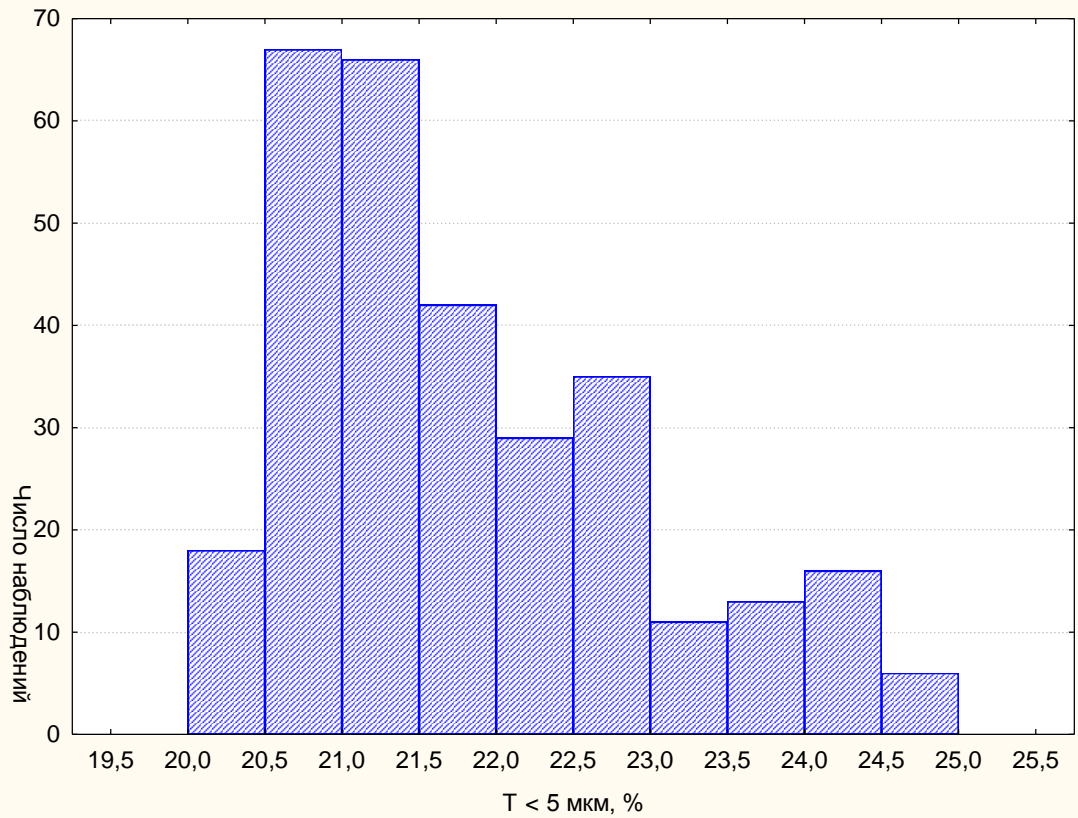


Рис. Б.5 Гистограмма содержания фракции до 5 мкм в шликере для формования заготовок изделия ОТИ 395

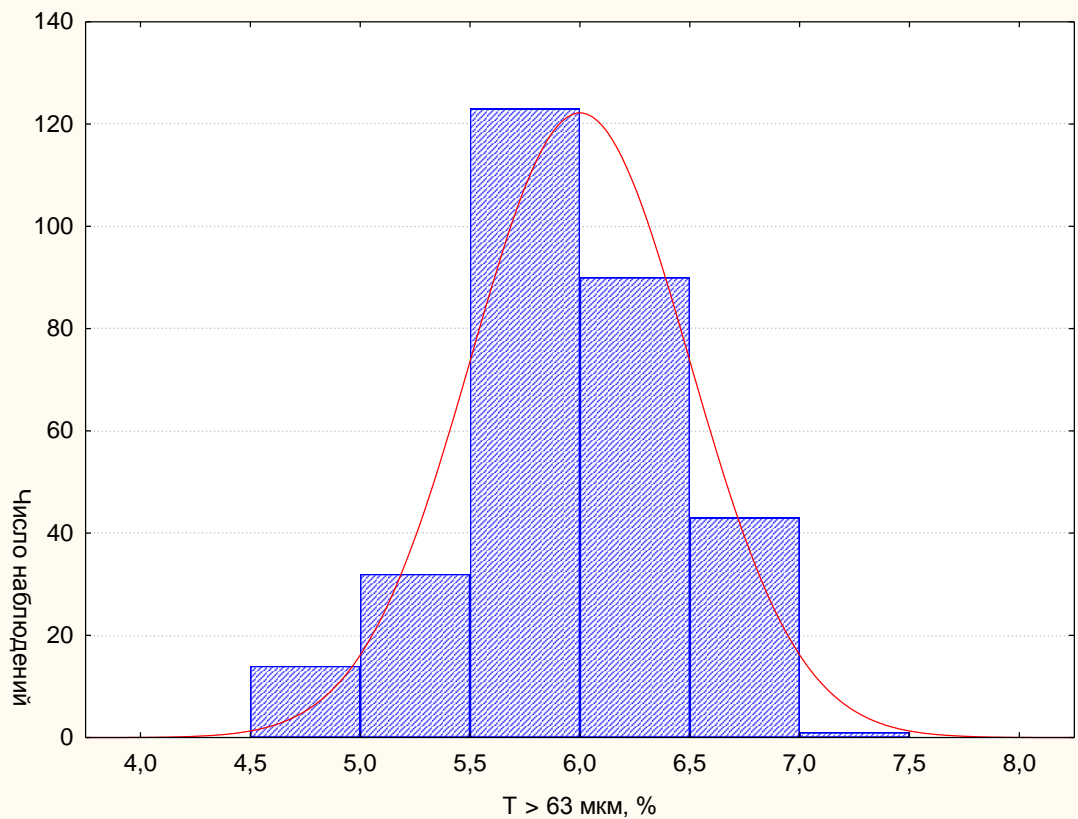


Рис. Б.6 Гистограмма содержания фракции выше 63 мкм в шликере для формования заготовок изделия ОТИ 395

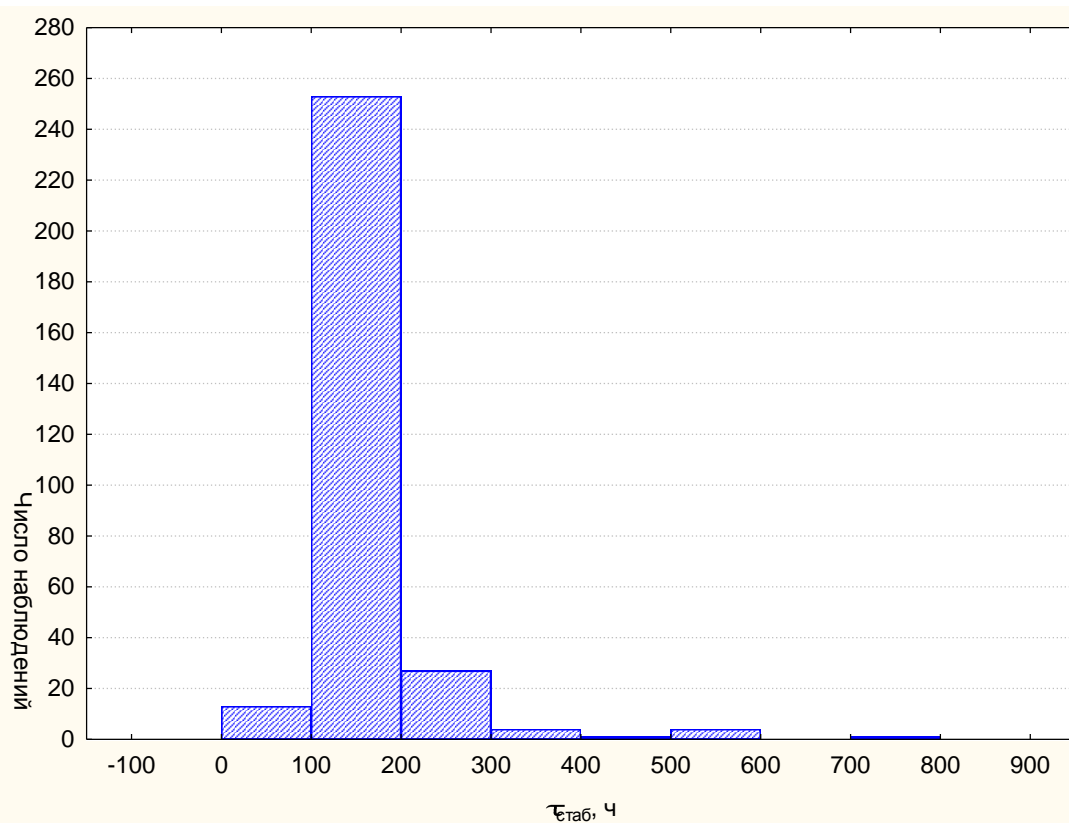


Рис. Б.7 Гистограмма длительности стабилизации шликера для формования заготовок изделия ОТИ 395

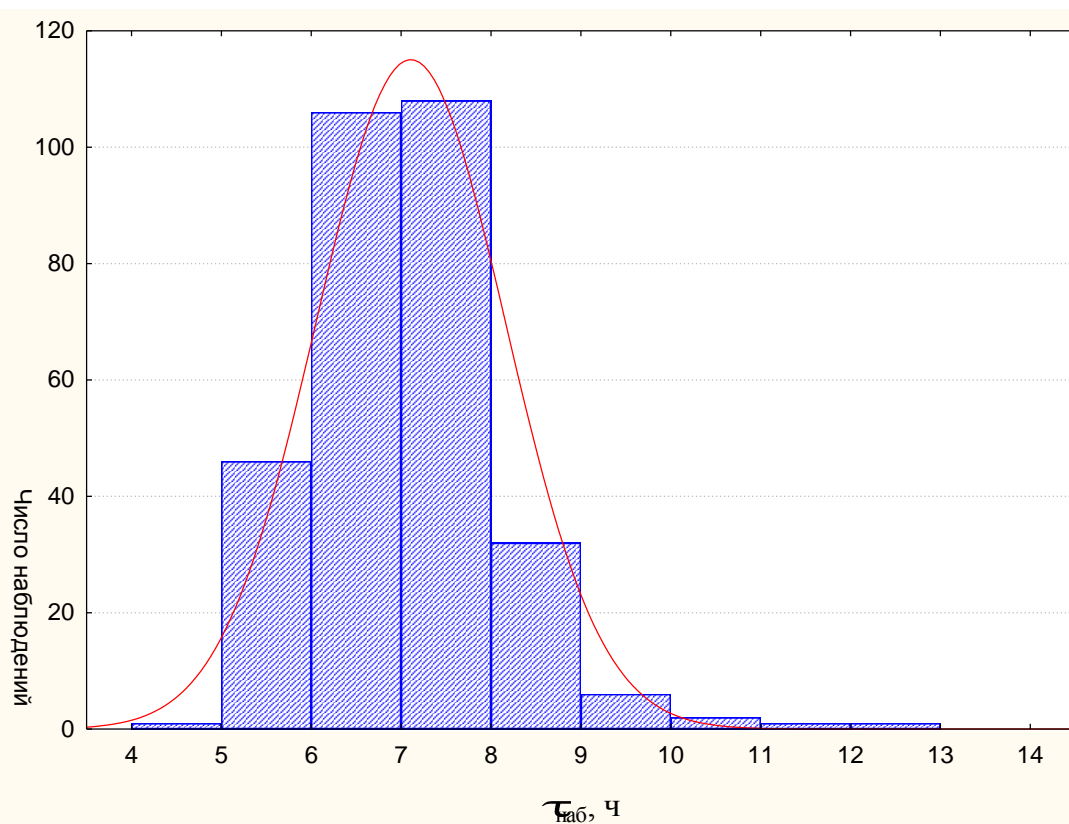


Рис. Б.8 Гистограмма длительности набора заготовок изделия ОТИ 395

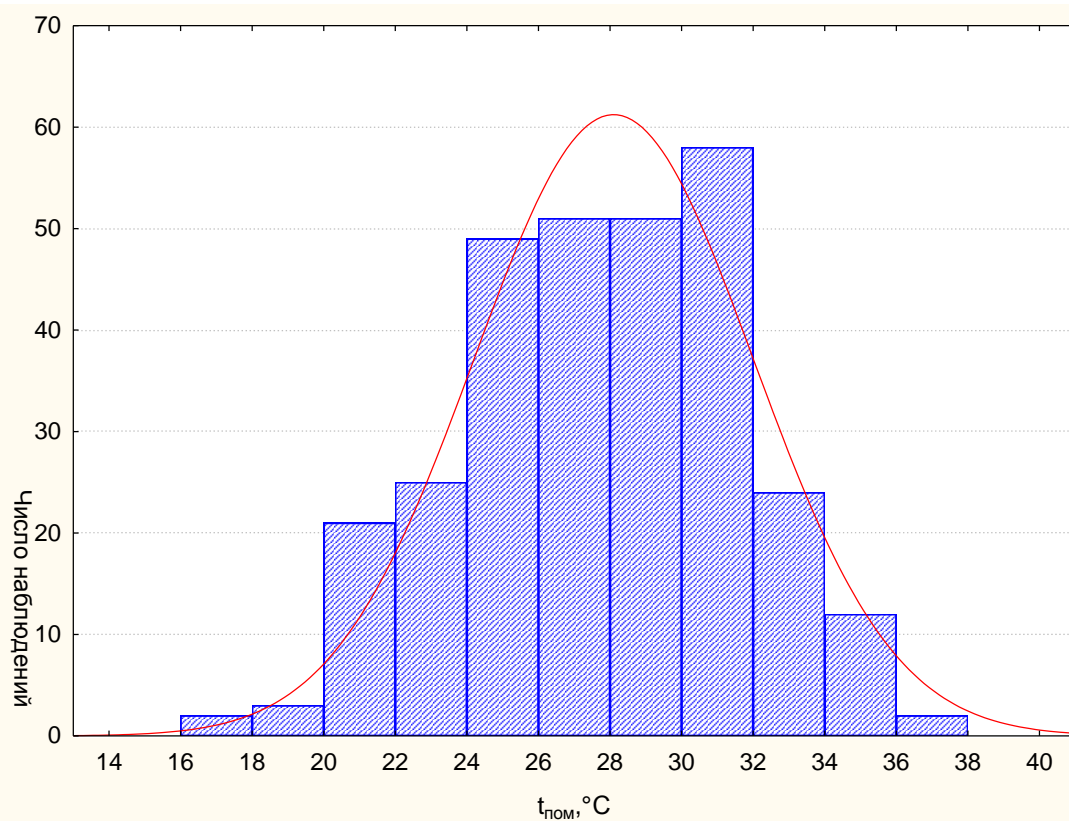


Рис. Б.9 Гистограмма температуры помещения в период формирования заготовок изделия ОТИ 395

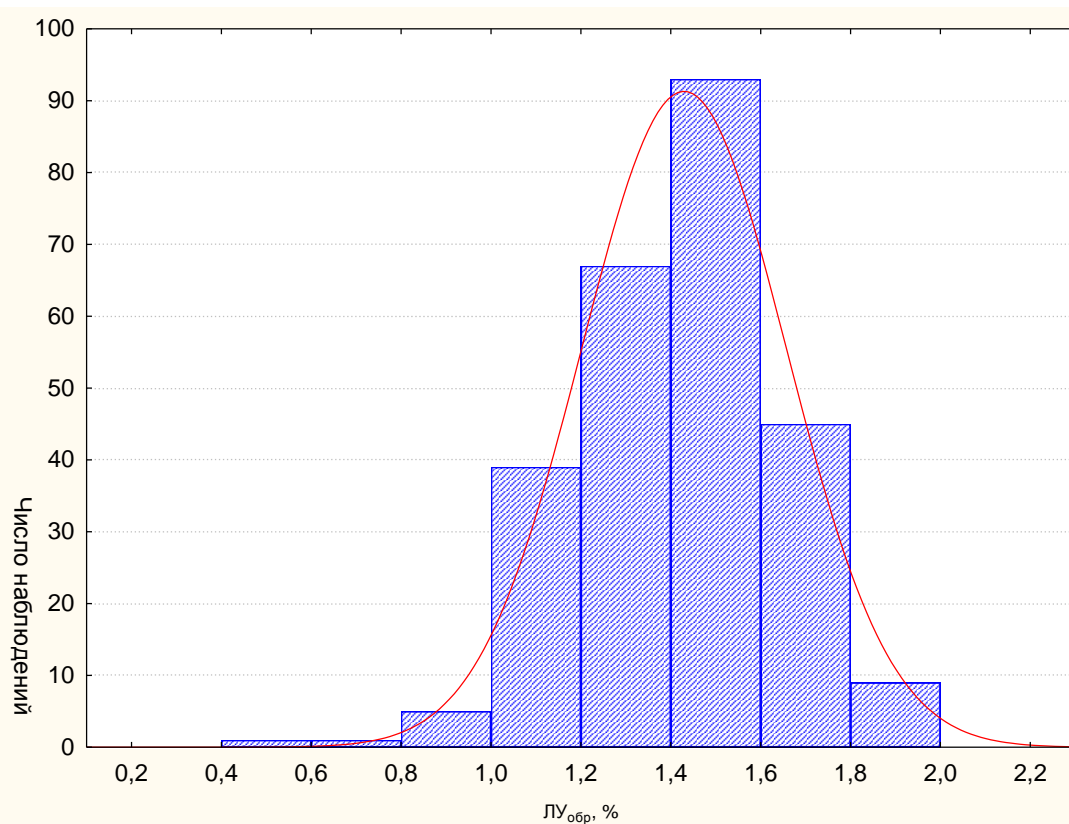


Рис. Б.10 Гистограмма линейной усадки по образующей заготовок изделия ОТИ 395

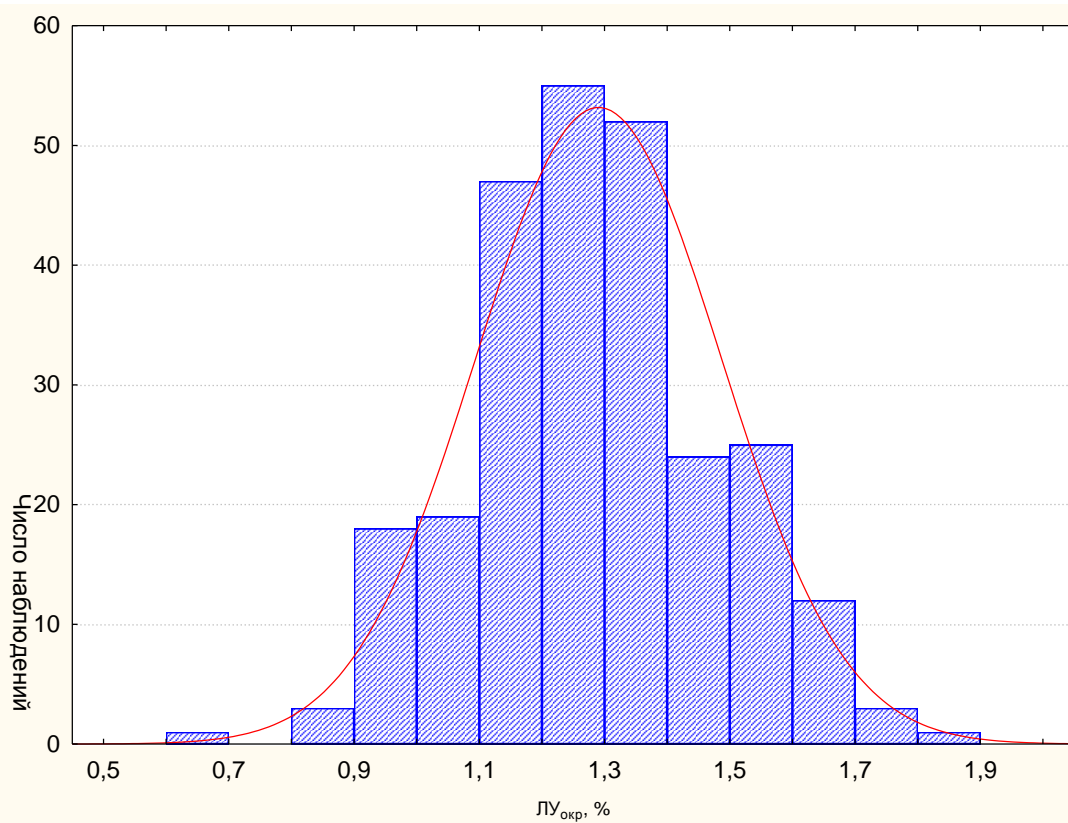


Рис. Б.11 Гистограмма линейной усадки по окружности заготовок изделия ОТИ 395

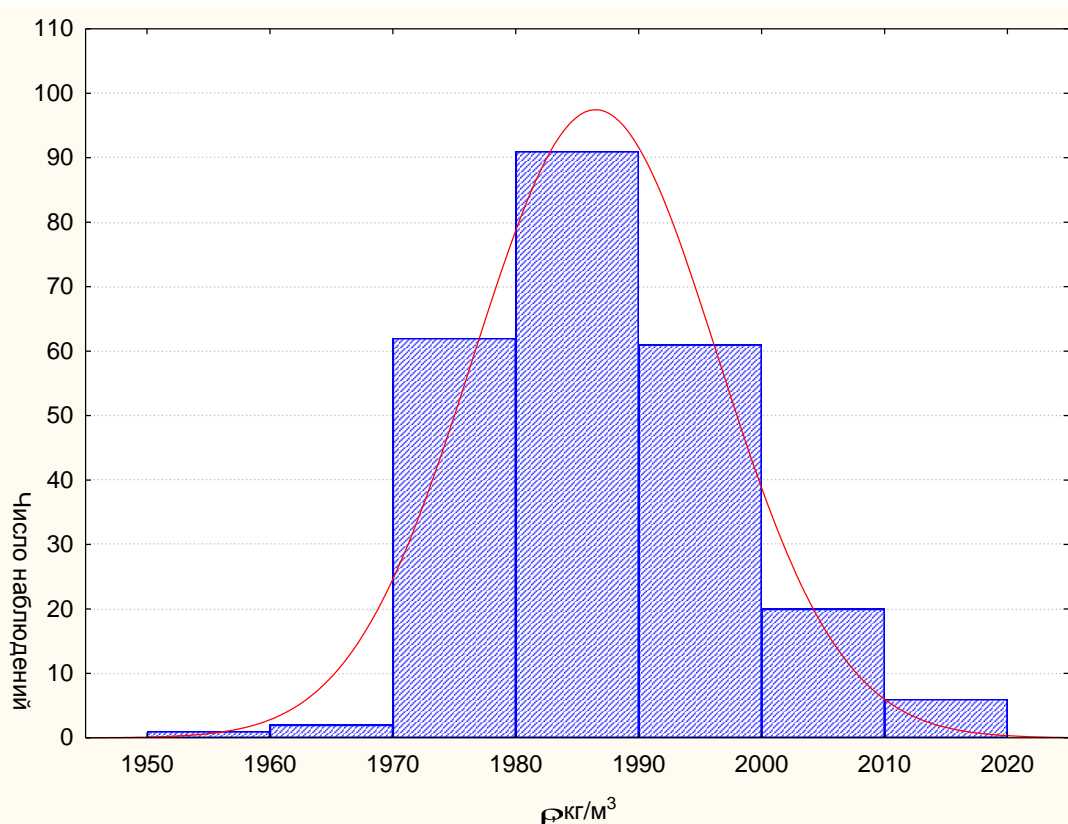


Рис. Б.12 Гистограмма кажущейся плотности образцов, вырезанных из технологического припуска заготовок изделия ОТИ 395

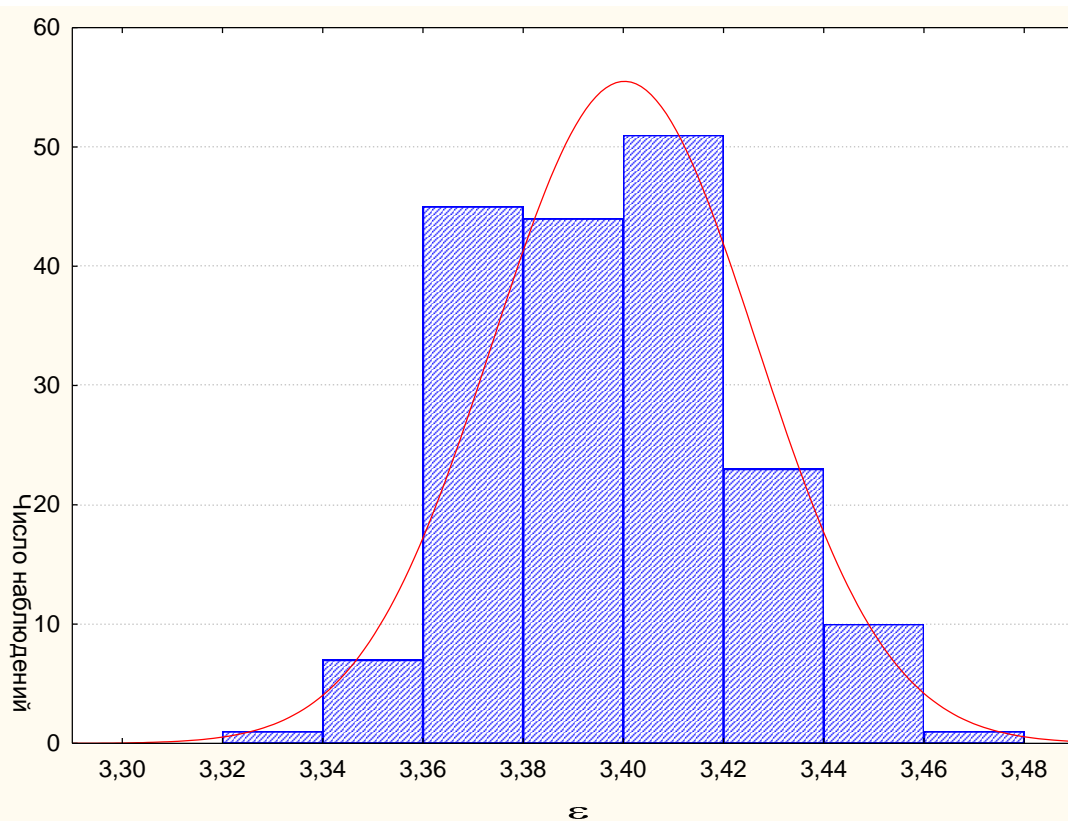


Рис. Б.13 Гистограмма диэлектрической проницаемости образцов, вырезанных из технологического припуска заготовок изделия ОТИ 395

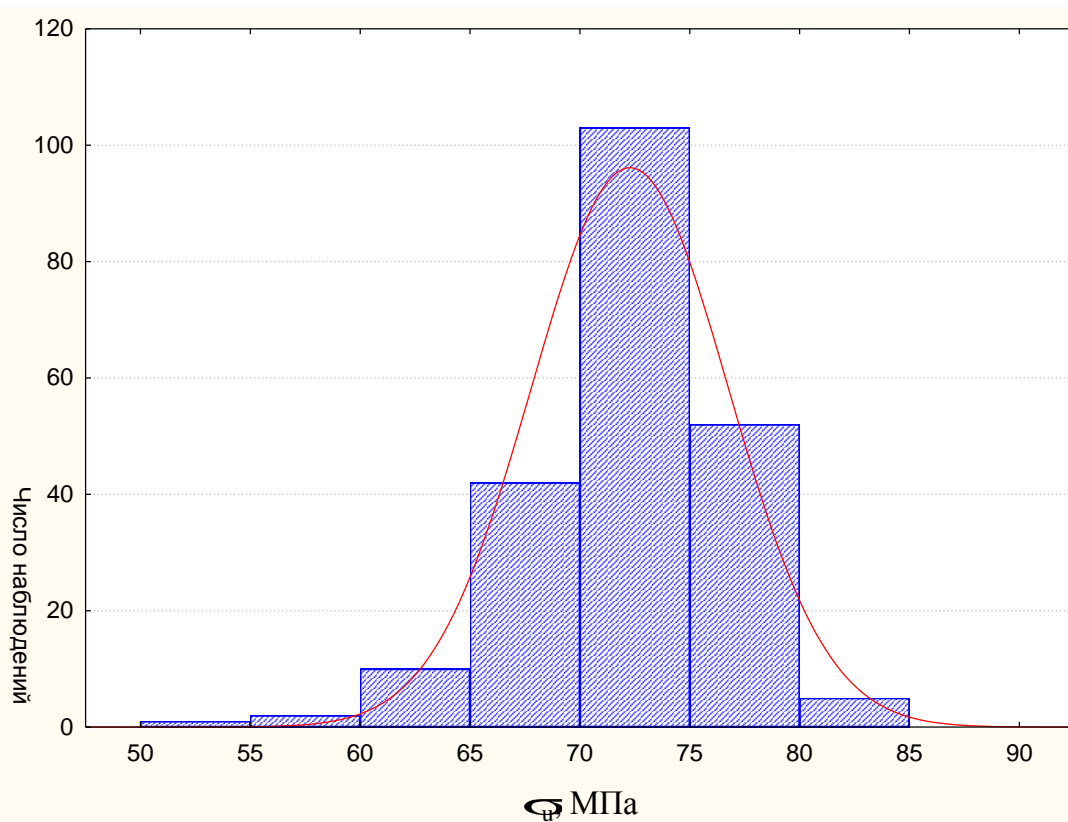


Рис. Б.14 Гистограмма средней прочности при изгибе по 10 образцам, вырезанным из технологического припуска заготовок изделия ОТИ 395

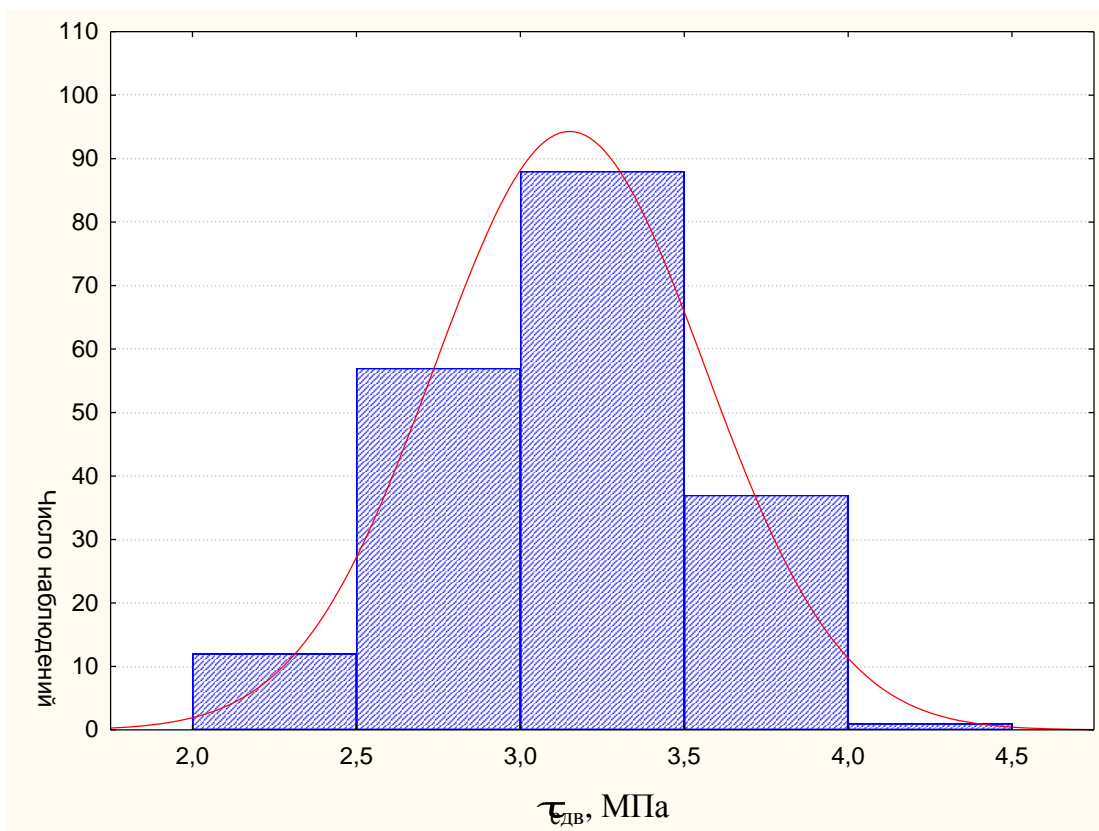


Рис. Б.15 Гистограмма средней прочности клеевого соединения при сдвиге по 6 образцам от оболочек изделия ОТИ 395

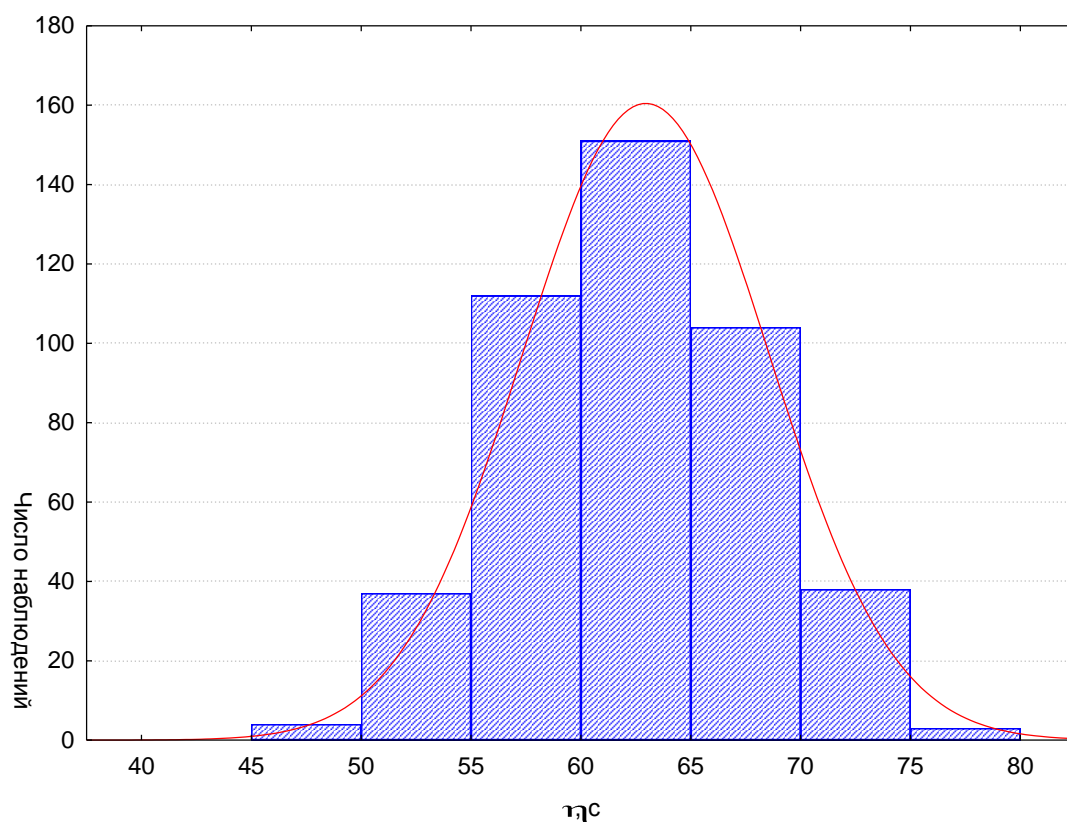


Рис. Б.17 Гистограмма вязкости шликера для формования заготовок изделия ОТИ 742

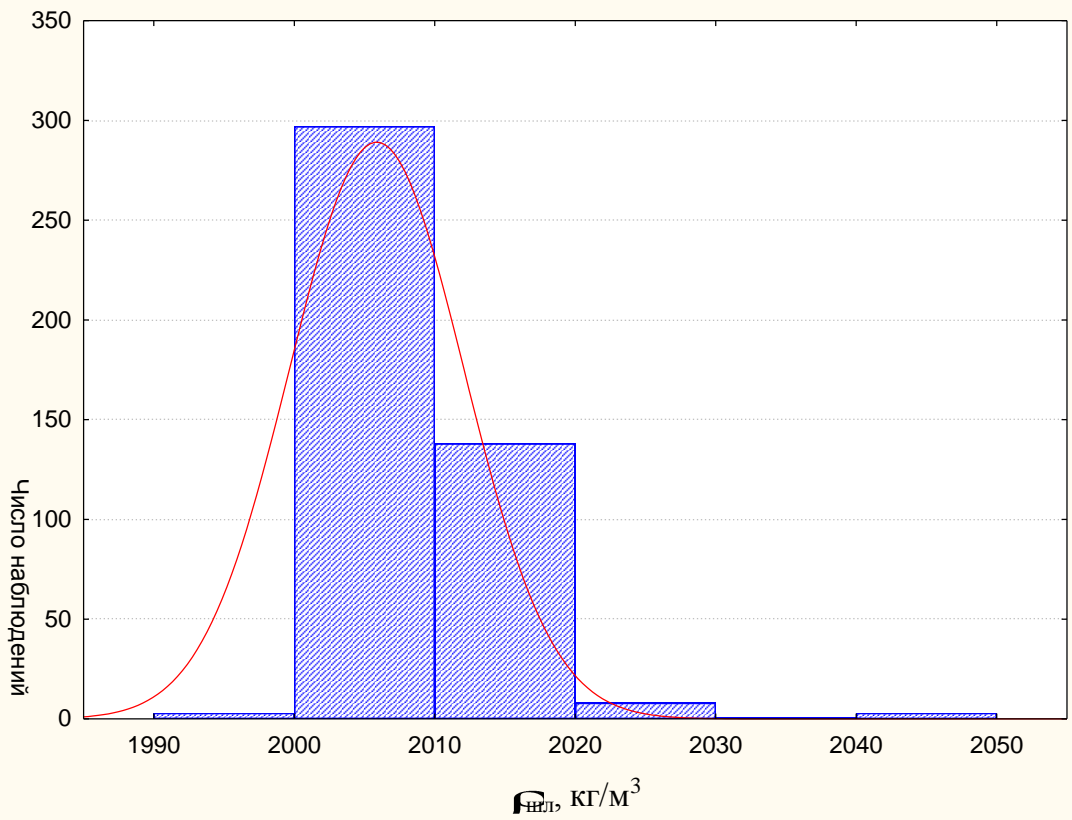


Рис. Б.18 Гистограмма плотности шликера для формования заготовок изделия ОТИ 742

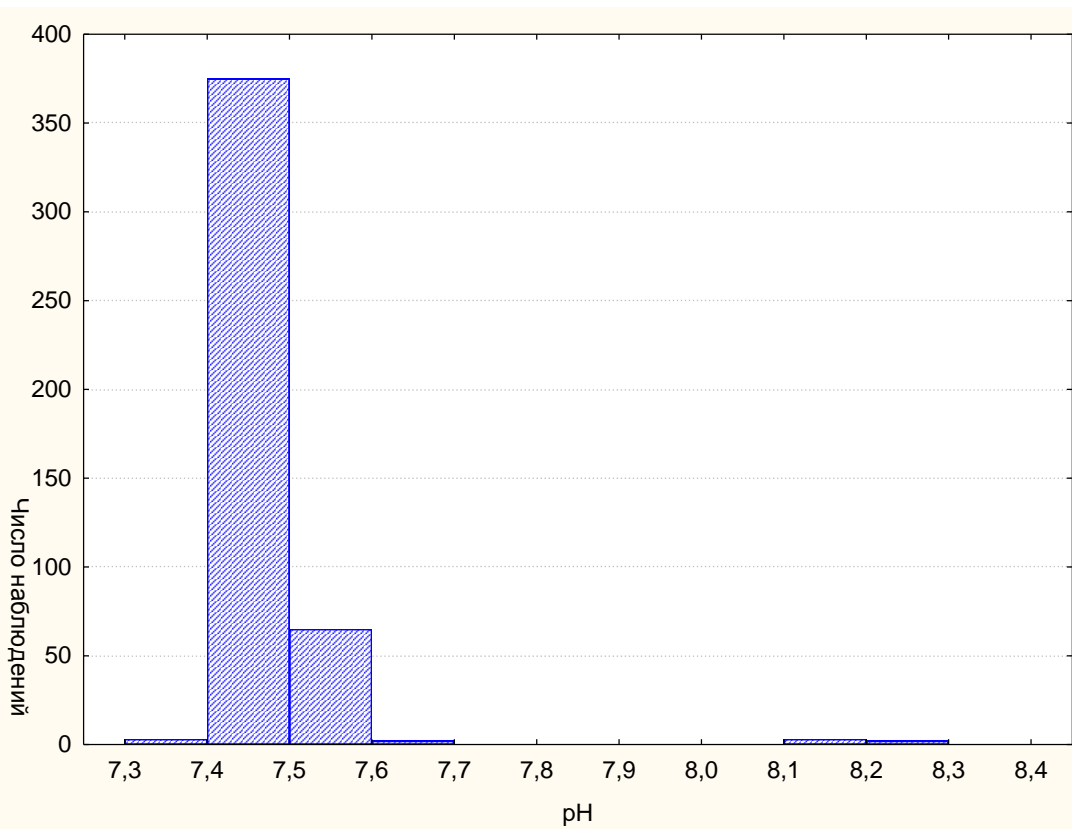


Рис. Б.19 Гистограмма pH шликера для формования заготовок изделия ОТИ 742

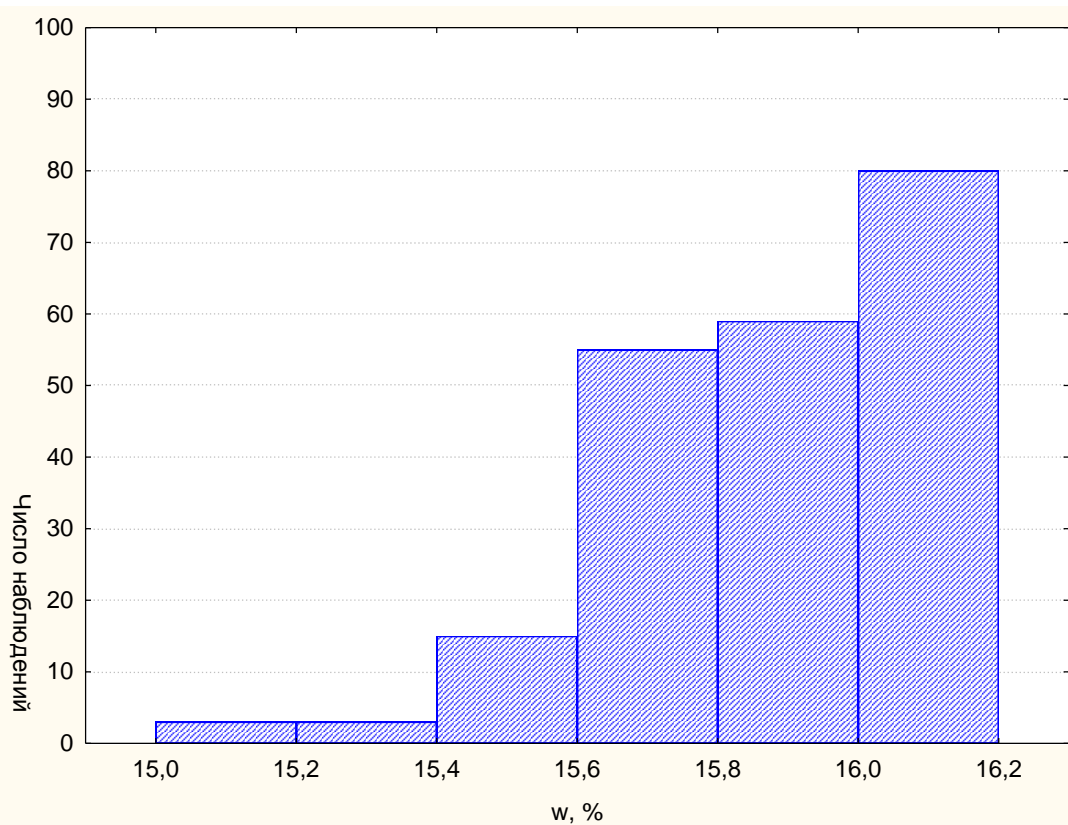


Рис. Б.20 Гистограмма влажность шликера для формования заготовок изделия ОТИ 742

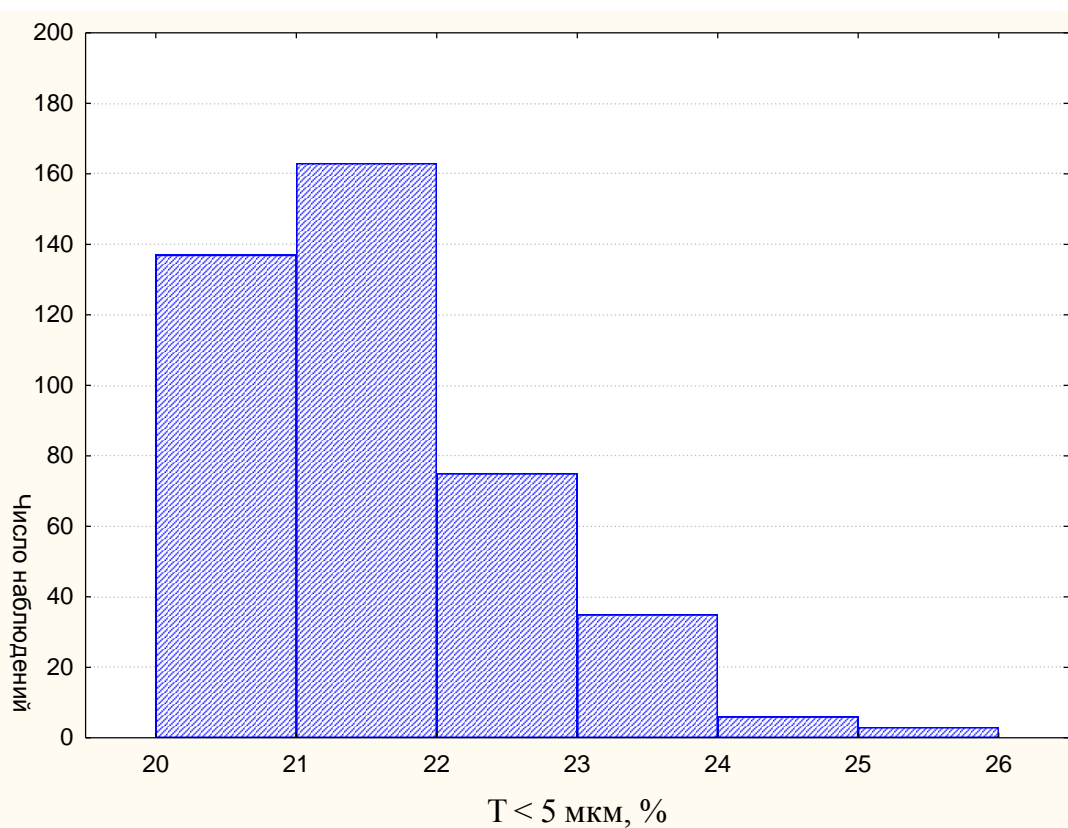


Рис. Б.21 Гистограмма содержания фракции до 5 мкм в шликере для формования заготовок изделия ОТИ 742

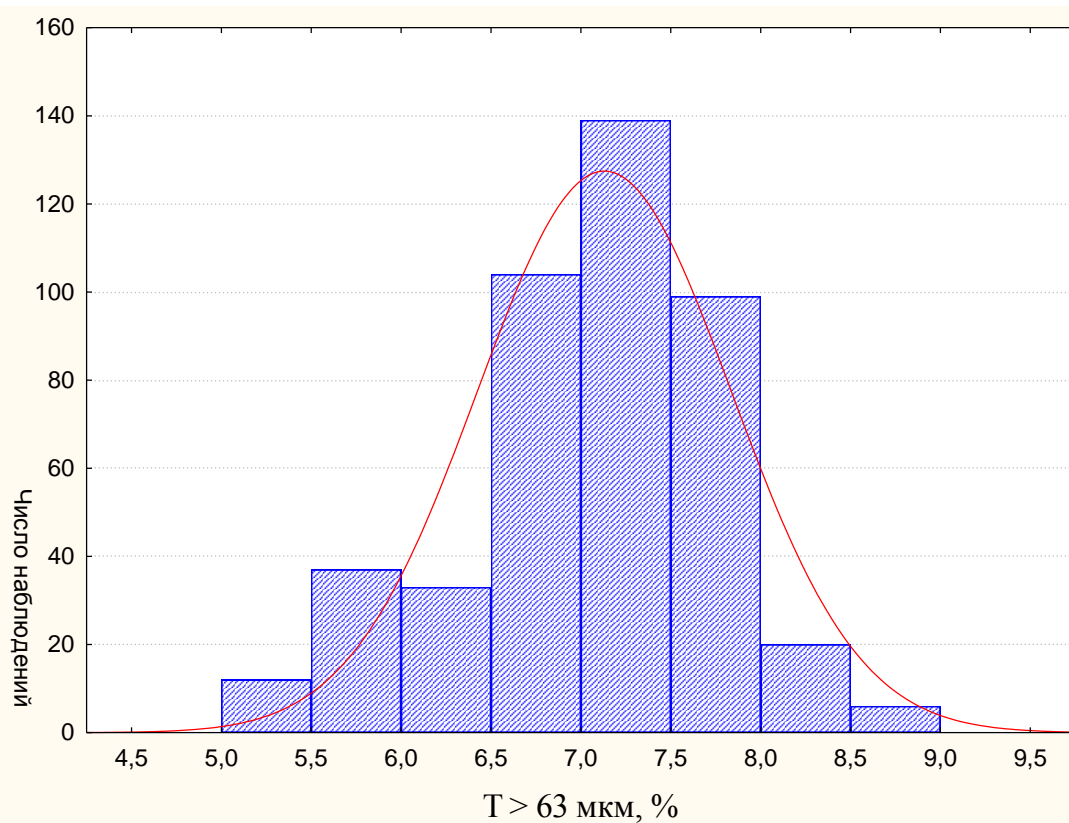


Рис. Б.22 Гистограмма содержания фракции выше 63 мкм в шликере для формирования заготовок изделия ОТИ 742

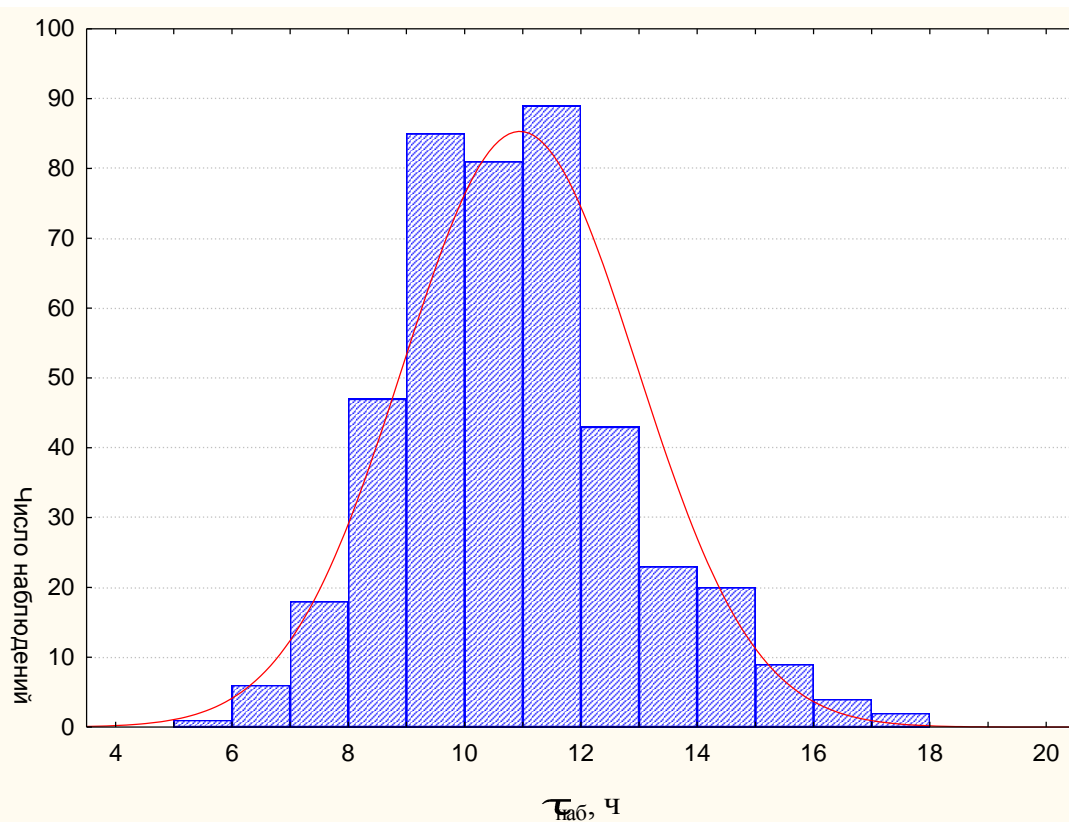


Рис. Б.23 Гистограмма длительности набора заготовок изделия ОТИ 742

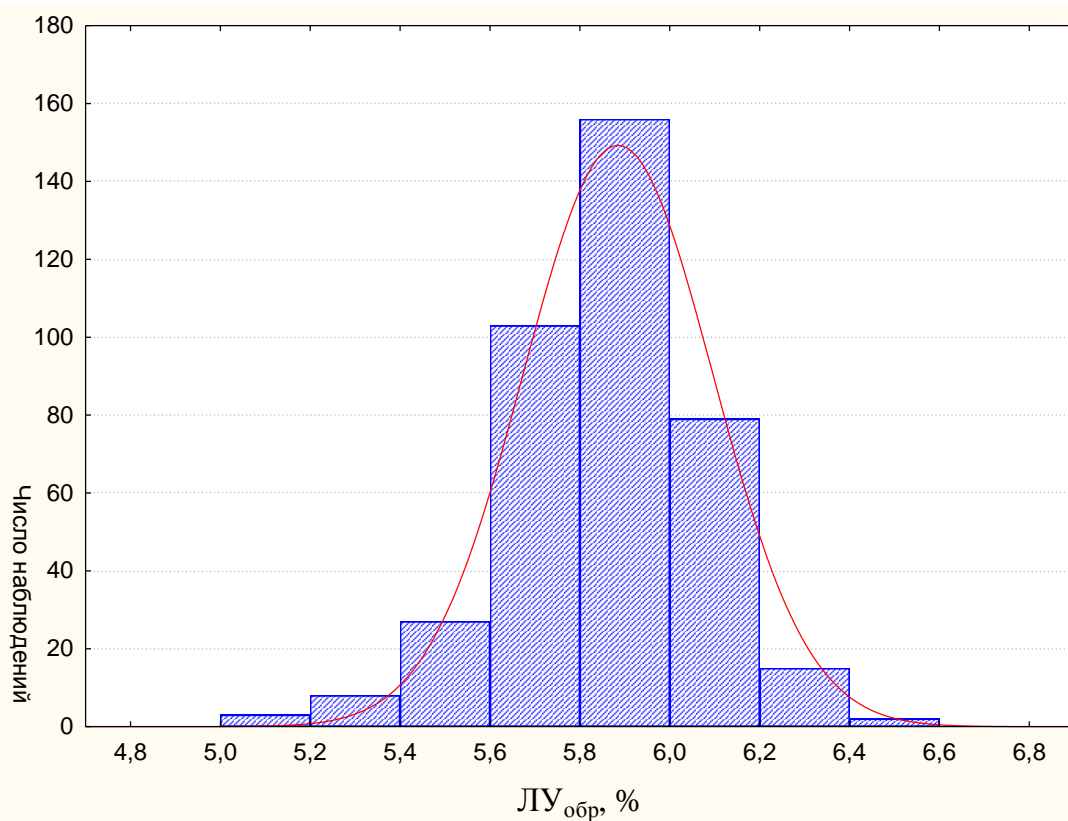


Рис. Б.24 Гистограмма линейной усадки по образующей заготовок изделия ОТИ 742

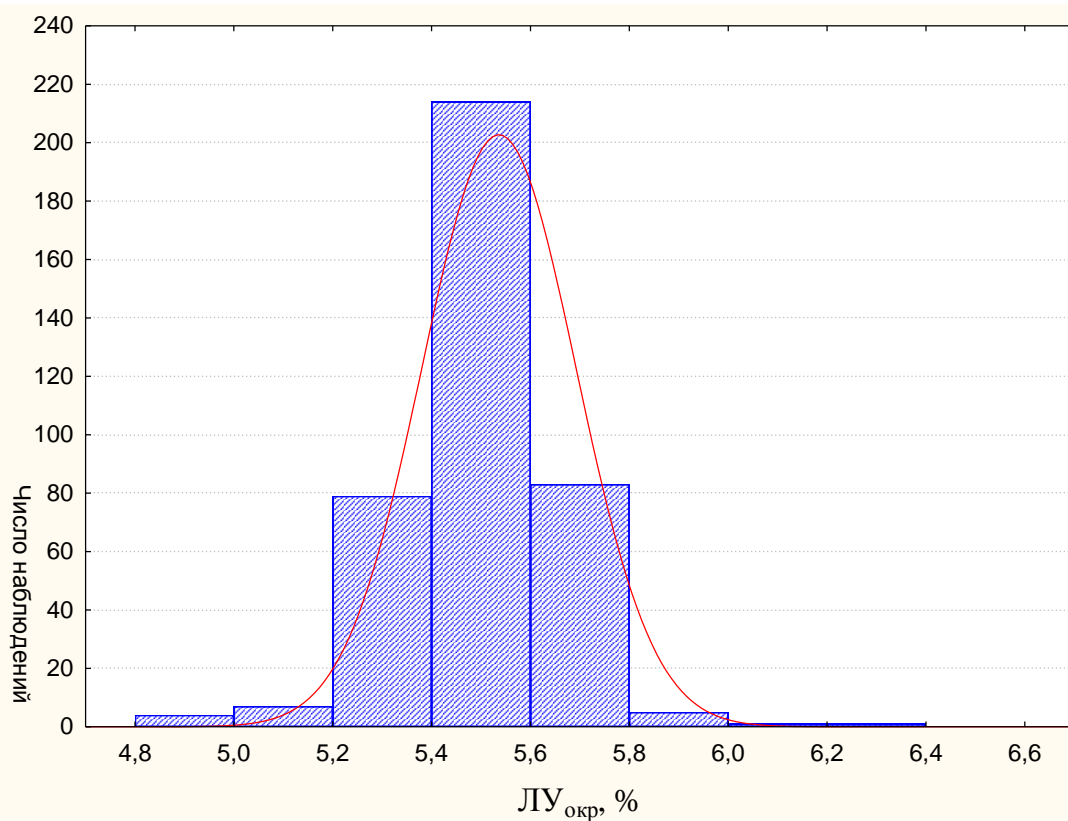


Рис. Б.25 Гистограмма линейной усадки по окружности заготовок изделия ОТИ 742

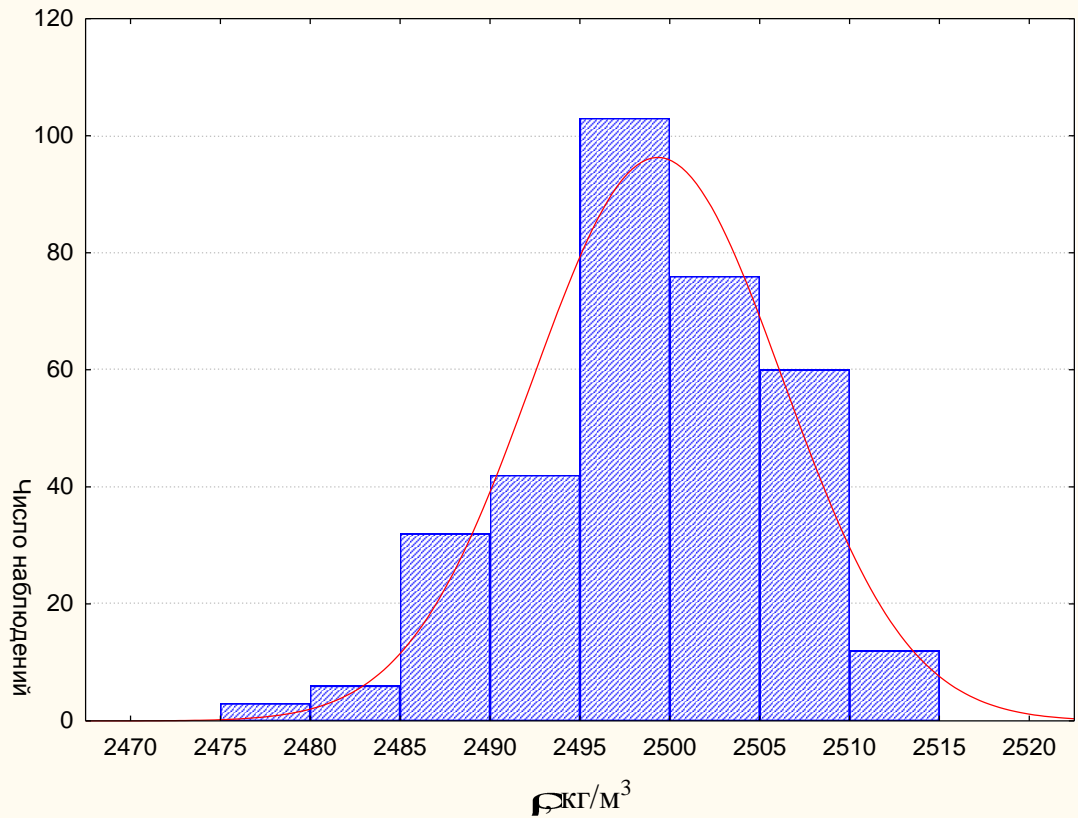


Рис. Б.26 Гистограмма кажущейся плотности образцов, вырезанных из технологического припуска заготовок изделия ОТИ 742

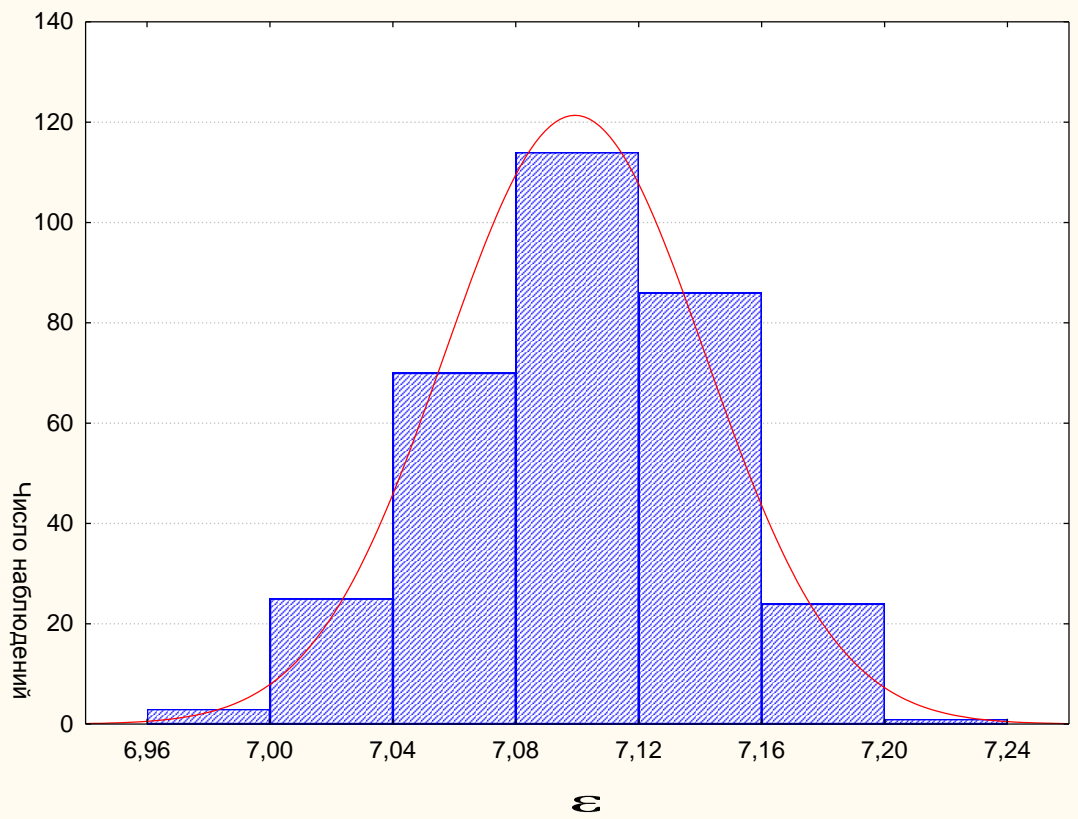


Рис. Б.27 Гистограмма диэлектрической проницаемости образцов, вырезанных из технологического припуска заготовок изделия ОТИ 742

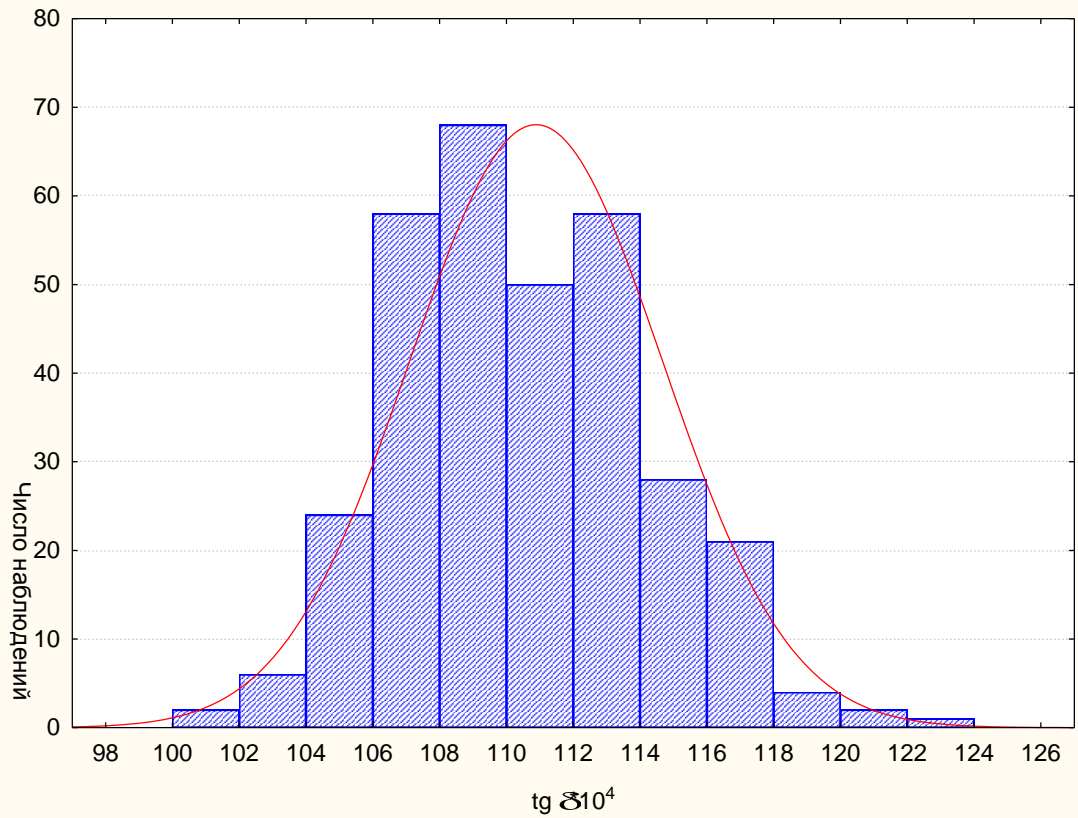


Рис. Б.28 Гистограмма тангенса угла диэлектрических потерь образцов, вырезанных из технологического припуска заготовок изделия ОТИ 742

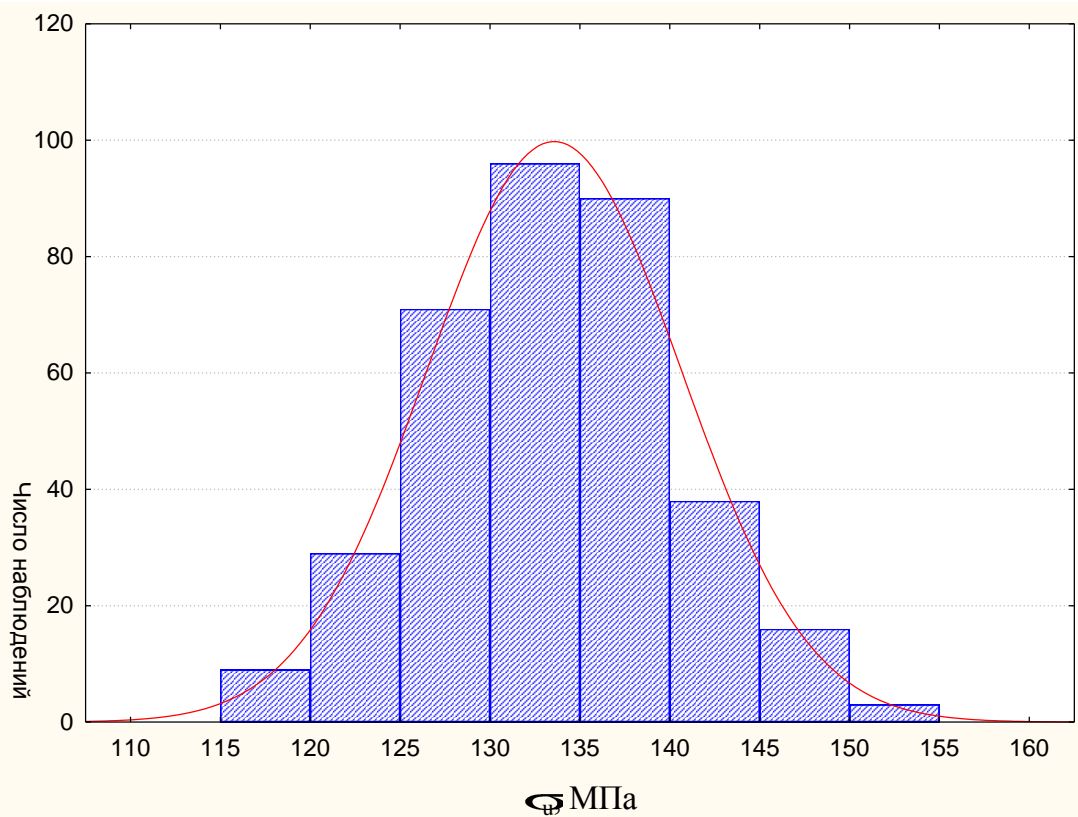


Рис. Б.29 Гистограмма средней прочности при изгибе по 10 образцам, вырезанным из технологического припуска заготовок изделия ОТИ 742

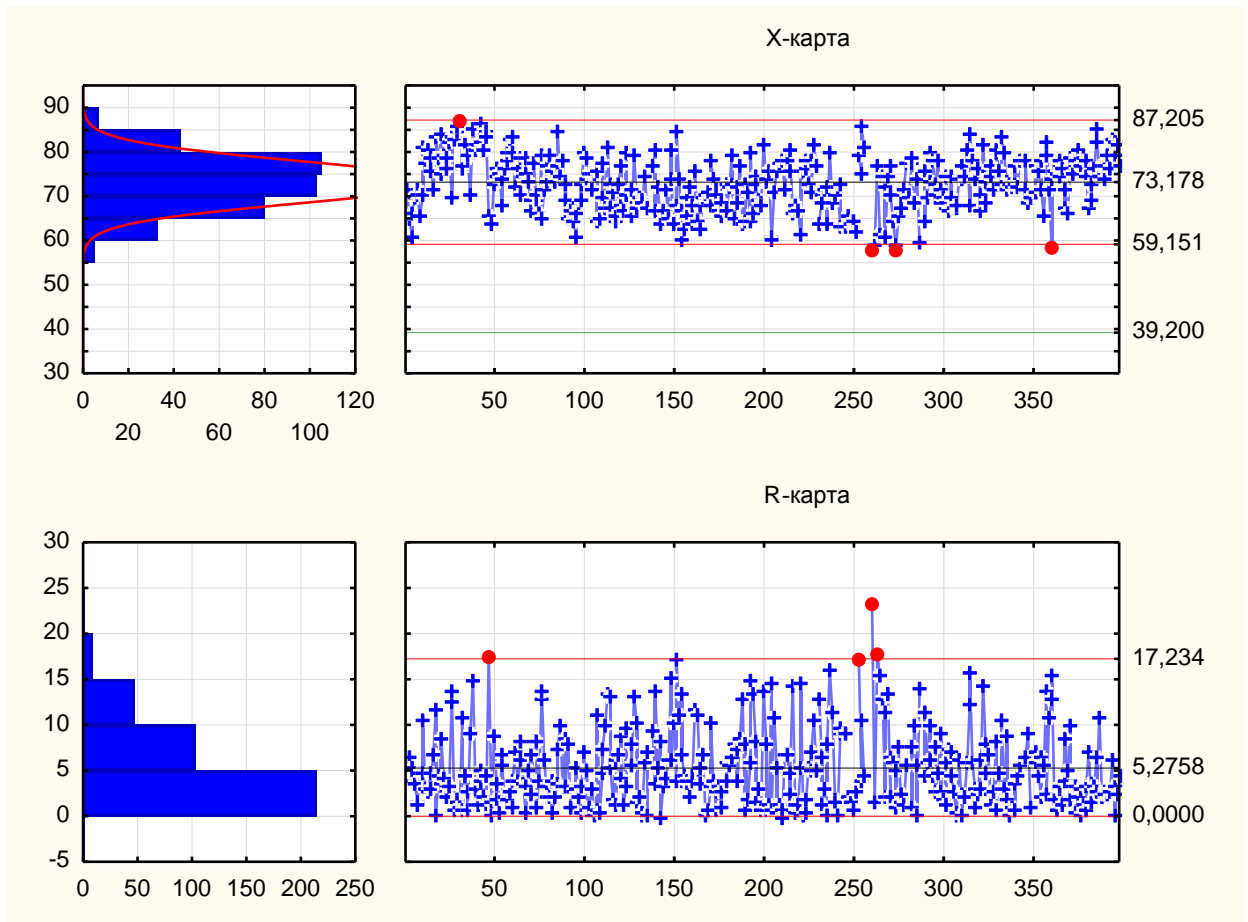


Рис. Б.30 X – R-карта для значений прочности при изгибе за 2010г. (НИАСИТ)

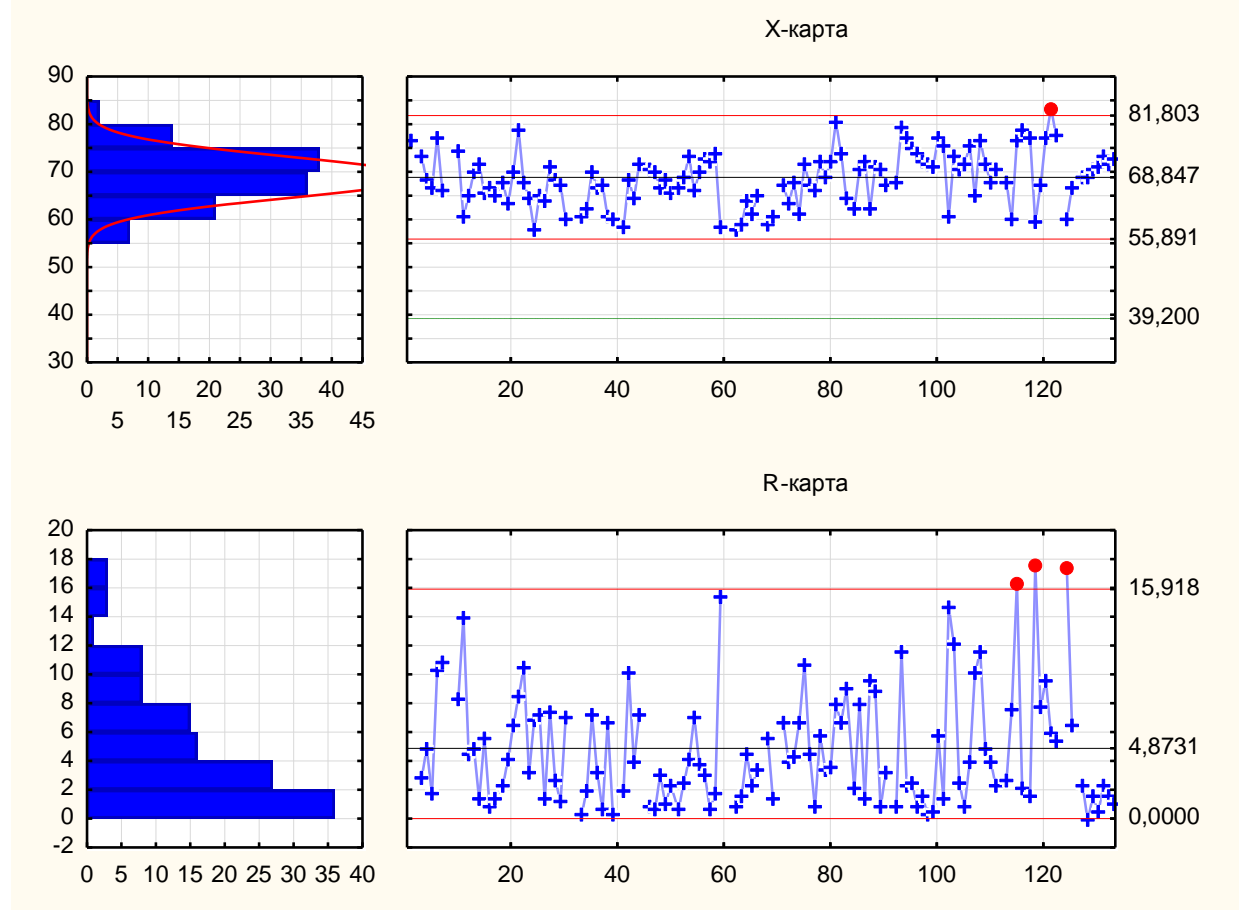


Рис. Б.31 X – R-карта для значений прочности при изгибе за 2011г. (НИАСИТ)

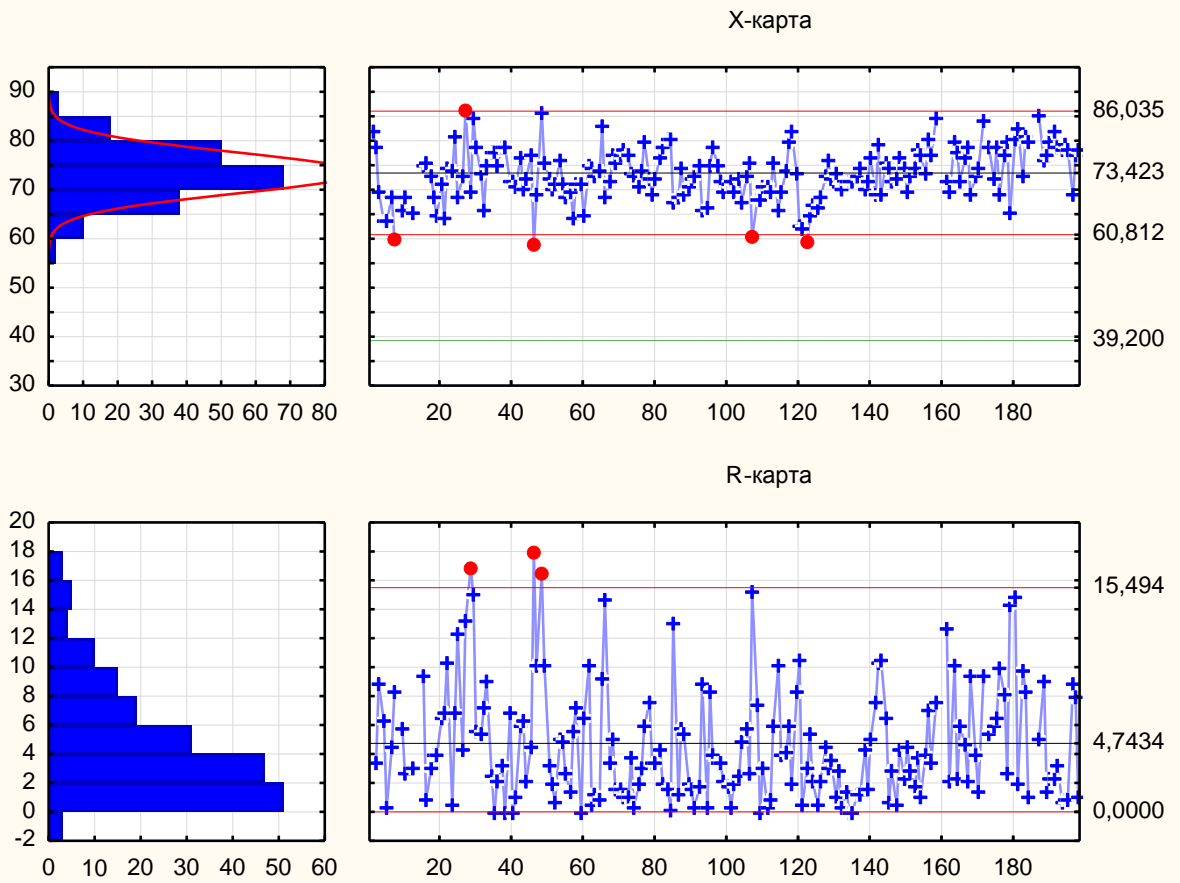


Рис. Б.32 X – R-карта для значений прочности при изгибе за 2012г. (НИАСИТ)

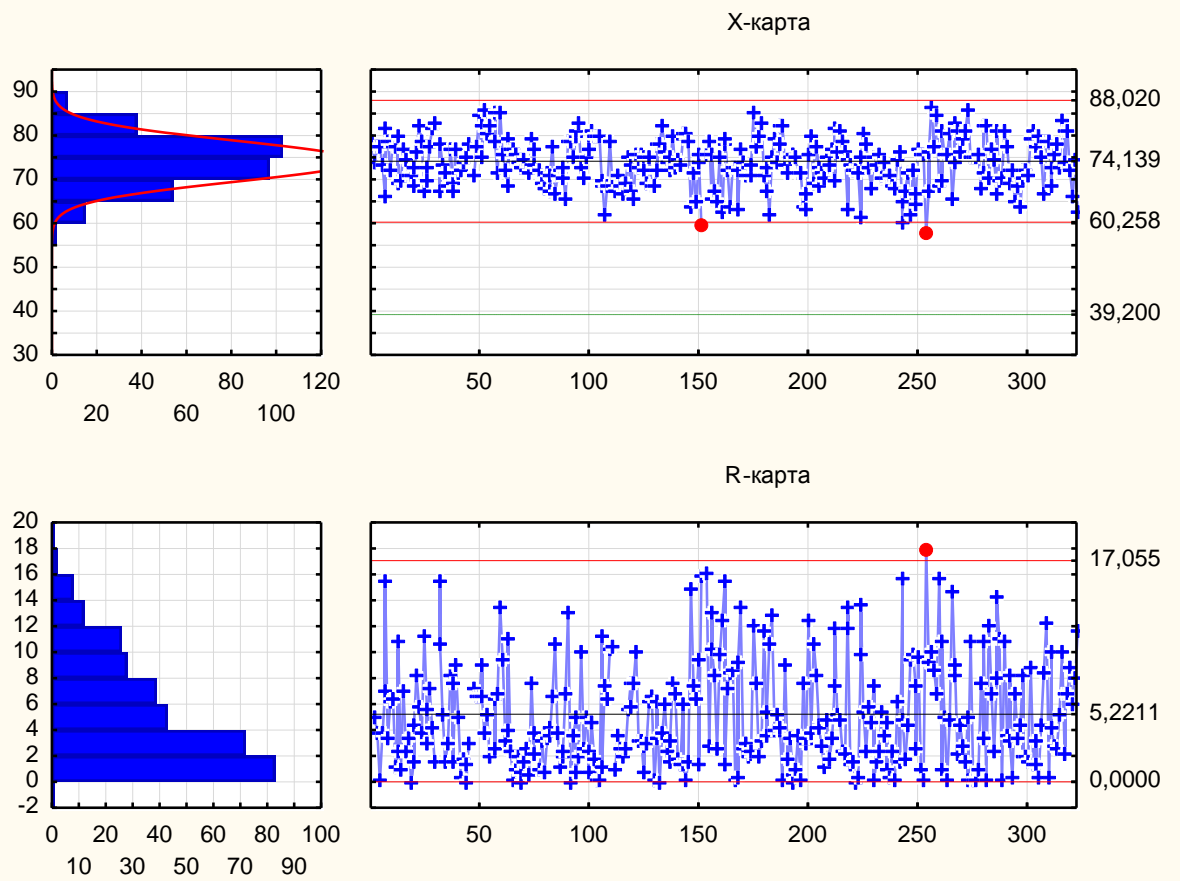


Рис. Б.33 X – R-карта для значений прочности при изгибе за 2013г. (НИАСИТ)

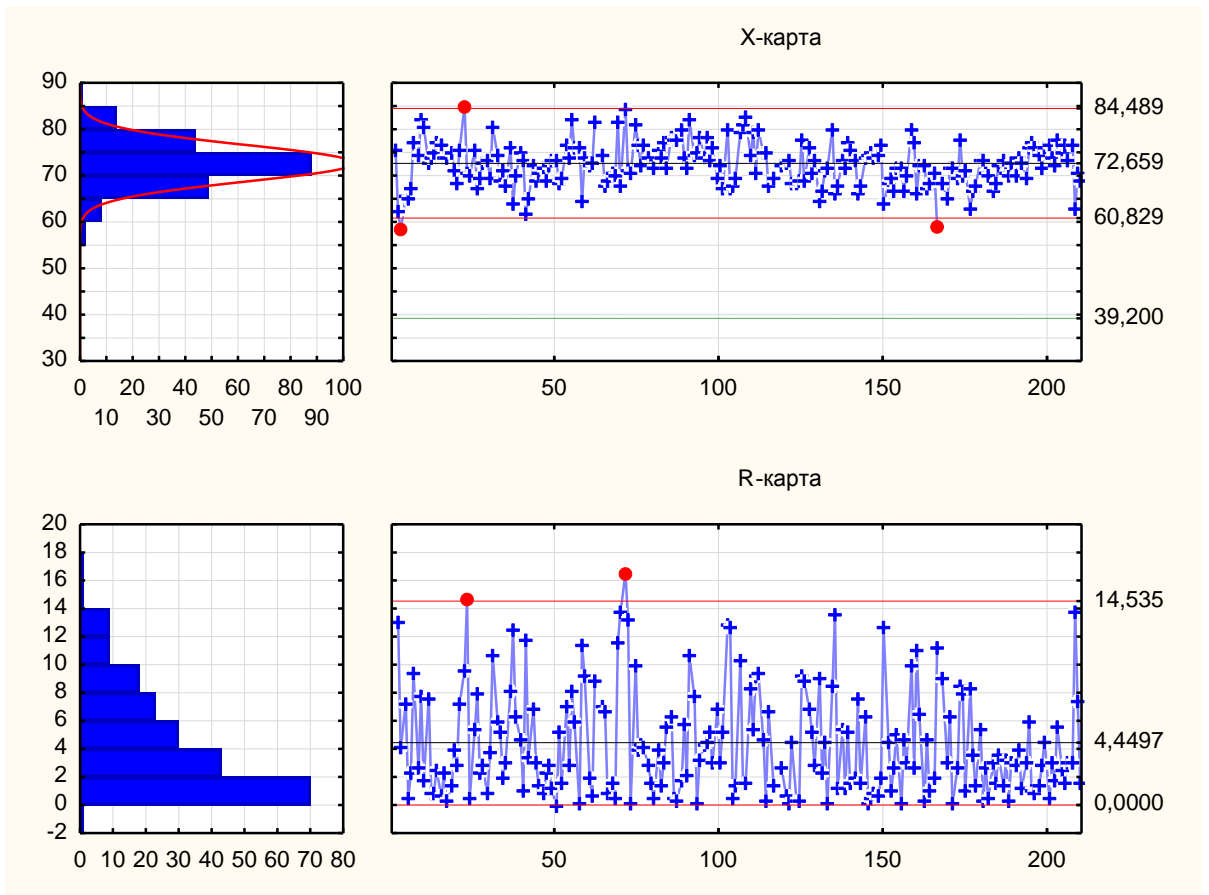


Рис. Б.34 X – R-карта для значений прочности при изгибе за I полугод. 2014г. (НИАСИТ)

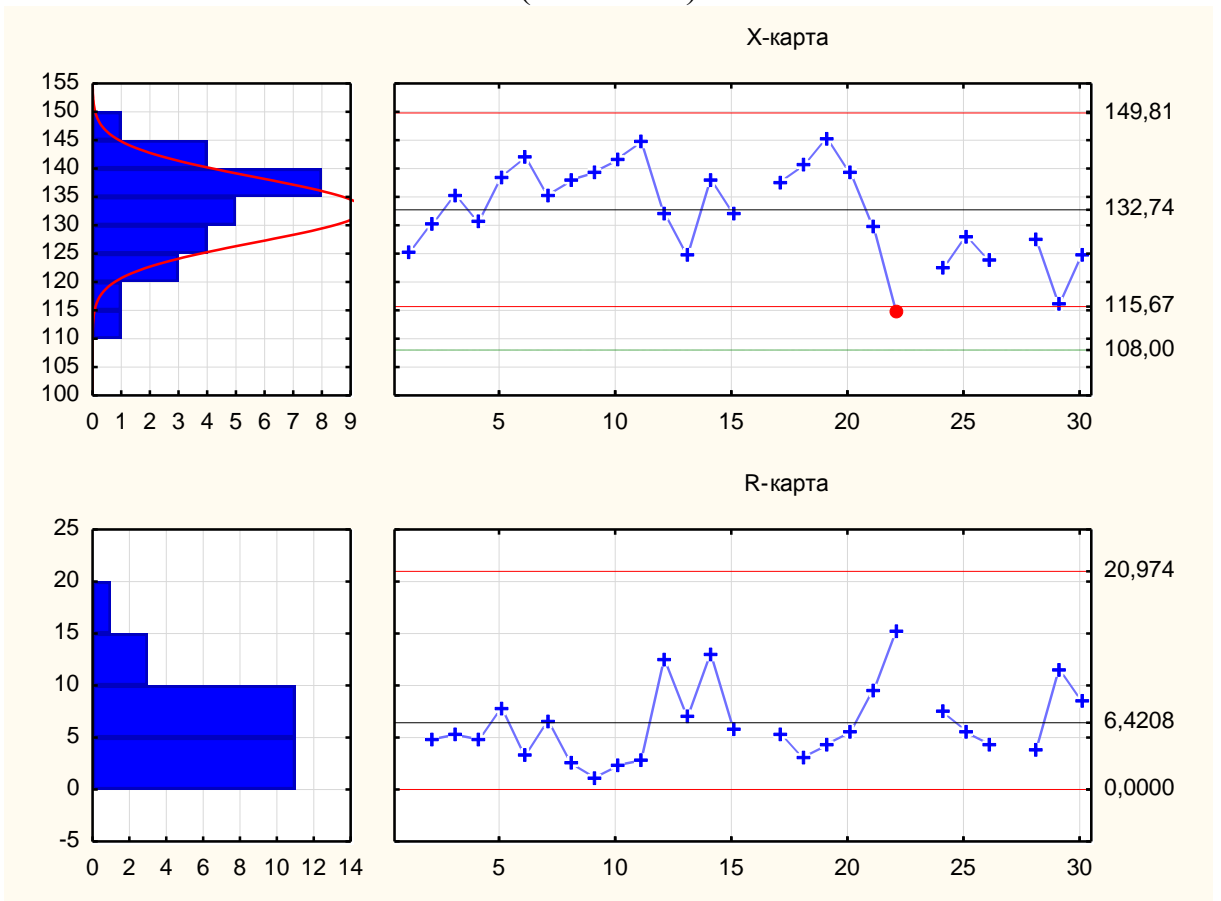


Рис. Б.35 X – R-карта для значений прочности при изгибе за 2010г. (ОТМ-357)

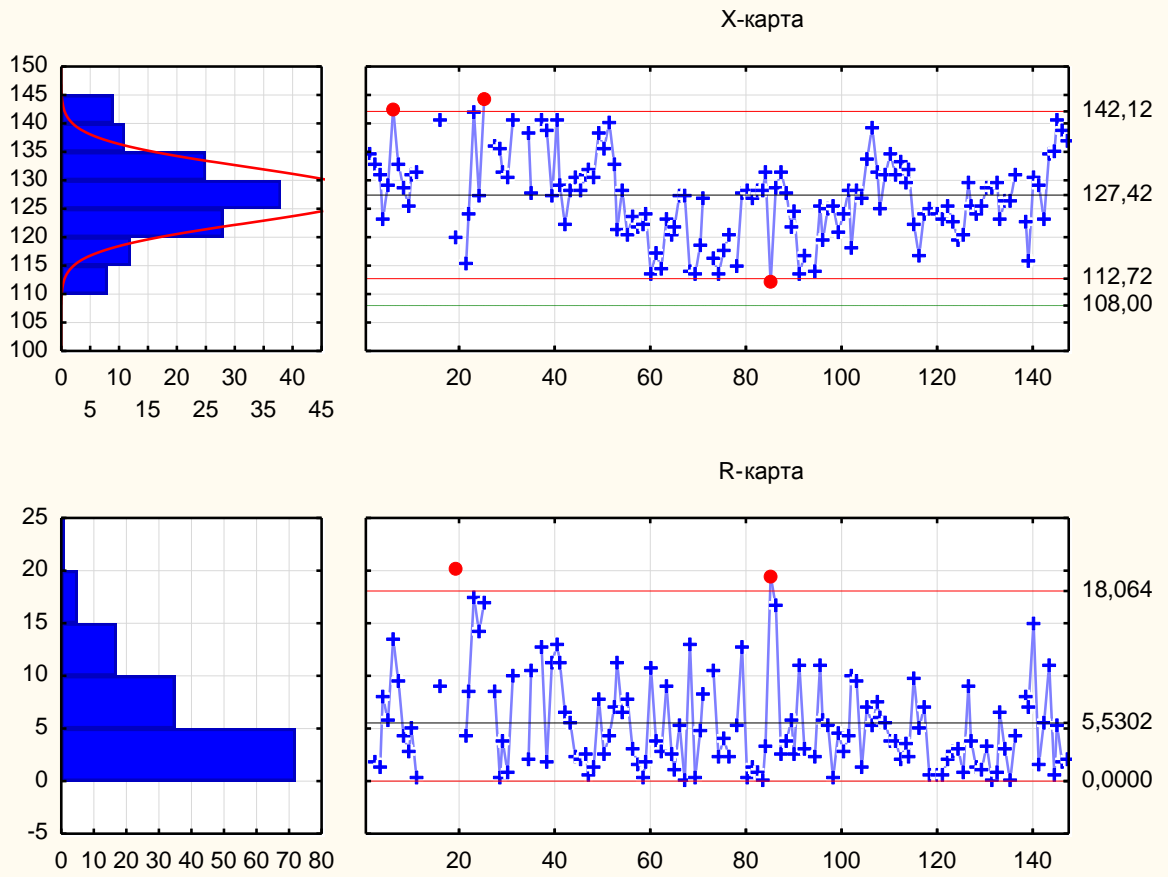


Рис. Б.36 X – R-карта для значений прочности при изгибе за 2011г. (ОТМ-357)

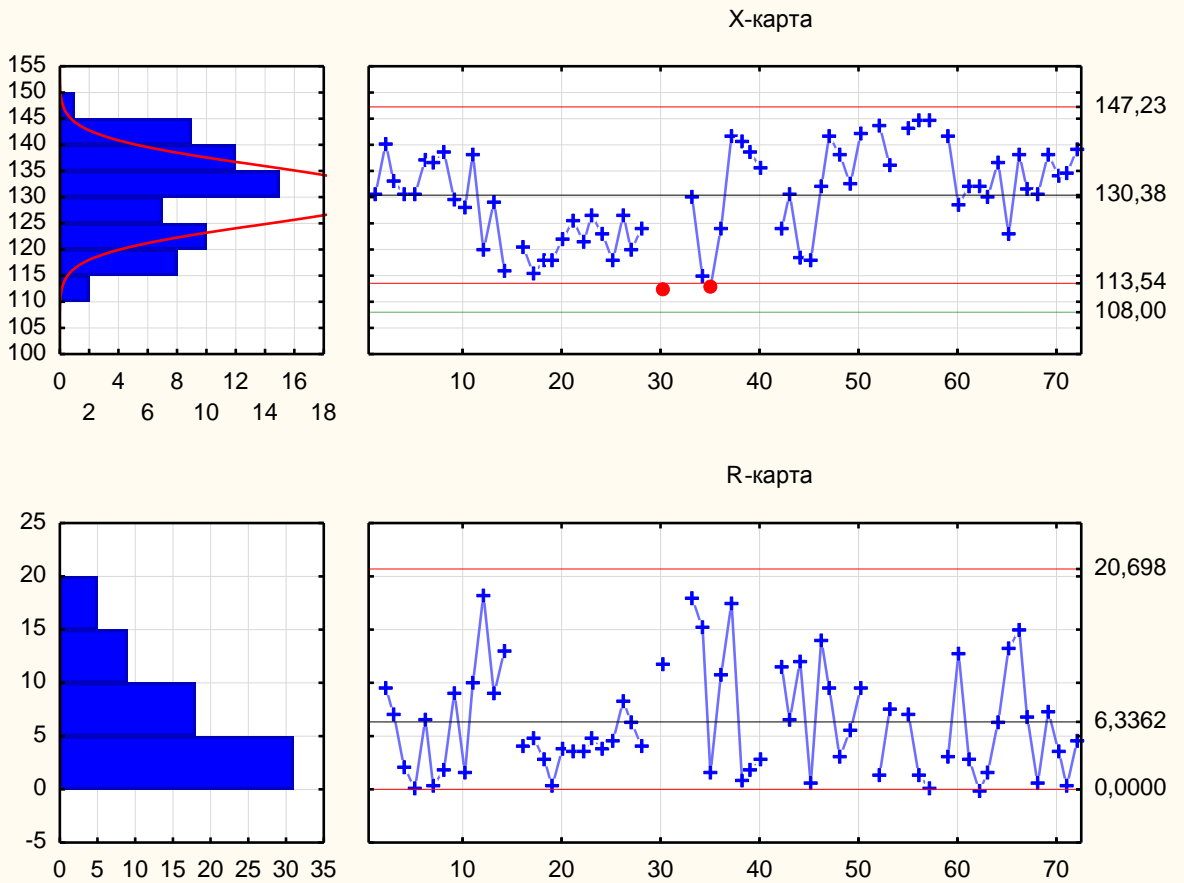


Рис. Б.37 X – R-карта для значений прочности при изгибе за 2012г. (ОТМ-357)

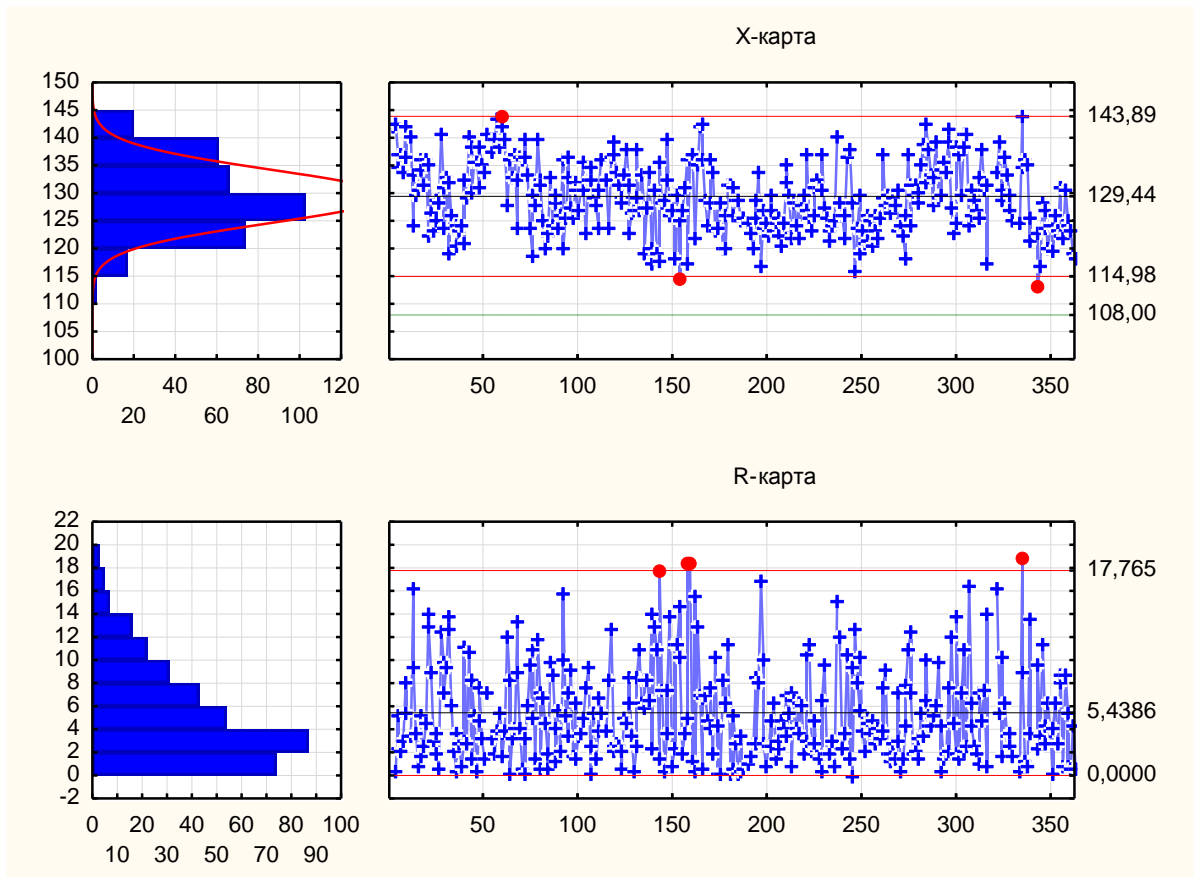


Рис. Б.38 X – R-карта для значений прочности при изгибе за 2013г. (ОТМ-357)

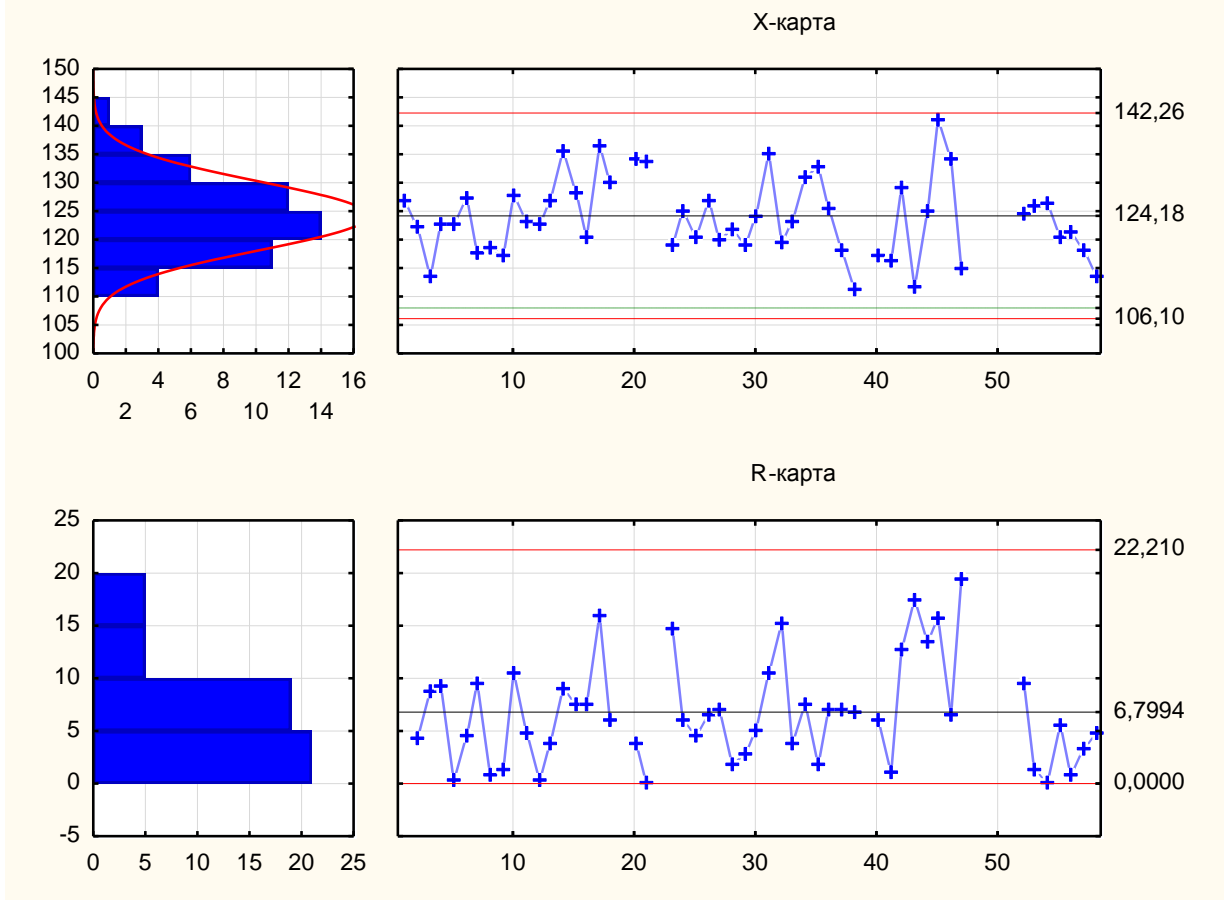


Рис. Б.39 X – R-карта для значений прочности при изгибе за I полугод. 2014г. (ОТМ-357)

УТВЕРЖДАЮ

Л. Д., Зам. генерального директора по научно-
производственной деятельности



ОАО «ОИПП «Технология»

Хмельницкий А.К.

2014 г.

Акт научно-технического внедрения

Настоящим актом подтверждаем, что разработанная в отделе 11 методика ПМ 596.1591-2004 «Оценка проектной надежности обтекателей», внедрена в производственную деятельность отдела 11 и используется для расчетов надежности (вероятности безотказной работы) изделий 9Б198, 9Б914, 3У100.6, 1801-1, 1801-2А, 1К-77, 2К-77, 3К-77, АК-78 и др.

Цель внедрения: оценка надежности антенных обтекателей по радиотехническим и прочностным характеристикам, обоснование прогнозов их работоспособности на стадиях проектирования, подтверждение расчетным путем заданного в техническом задании требуемого уровня надежности, подготовка технической документации для Заказчика.

Разработчик программного обеспечения: Кирюшина В.В., математик 2 кат. отдела 11.

Начальник отдела 11

Воробьев С. Б.

СОГЛАСОВАНО:

Ученый секретарь

Келина И. Ю.