

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН НЕИСПРАВНОСТЕЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

*Методические указания*

САМАРА 2004

**2005**

Составители: Н.Н. Игонин, Г.А. Новиков, И.Г. Старостин

УДК 629.7.017.(07)

**Исследование причин неисправностей авиационной техники: Методические указания / Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Сост. Н.Н. Игонин, Г.А. Новиков, И.Г. Старостин**. Самара, 2004. 44 с.

Даны методика и пример исследования причин возникновения неисправностей летательных аппаратов (ЛА). Приведены основные правила оформления работы.

Предназначены для выполнения курсовых и соответствующих разделов дипломных работ по курсу «Техническая эксплуатация ЛА и АД» (специальность 130.300). Подготовлены на кафедре ЭАТ.

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета.

Рецензент Панин Е.А.

## *Общие сведения*

Анализ отказов и неисправностей авиационной техники производится с целью повышения ее эксплуатационной надежности по следующим направлениям

1. Выявление конструктивных и производственных недостатков дает возможность разработать требования и рекомендации для промышленности по совершенствованию конструкции и технологического процесса изготовления изделий.
2. Выявление отказов и неисправностей, связанных с недостатками ремонта, изменение на основе их анализа технологии ремонта, уточнение методов дефектации и ремонтных допусков.
3. Выявление отказов и неисправностей, связанных с недостатками эксплуатации, разработка предложений по совершенствованию действующих регламентов технического обслуживания.
4. Накопление информации для обоснования рекомендаций по вопросам определения межремонтных и технических ресурсов авиационной техники.

Установление причин появления неисправностей и отказов авиационной техники является сложной задачей, что объясняется многообразием факторов, их вызывающих. Не менее сложны задачи, связанные с разработкой мероприятий по предупреждению появления неисправностей.

Решение этих вопросов составляет одну из основных функций производящих, эксплуатационных и ремонтных предприятий.

## **1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ**

Курсовая работа «Исследование причин появления неисправностей авиационной техники» является самостоятельной работой студентов, которую они выполняют на основе знаний, полученных при изучении курсов «Техническая эксплуатация ЛА и АД», «Конструкция и прочность ЛА», «Конструкция и прочность АД», общетехнических дисциплин, а также материалов и сведений, приобретенных во время производственной практики на предприятиях гражданской авиации (ГА) и авиационной промышленности (МАП).

Основная цель работы — научить студентов проводить самостоятельные исследования причин появления неисправностей, отказов, дефектов авиационной техники.

Задания на курсовую работу предусматривают установление причин появления неисправностей элементов шасси, планера, топливной, масляной, гидравлической и высотной систем, двигателей и т.д.

При выполнении курсовой работы студент должен показать умение работать с литературой, производить инженерные расчеты, грамотно оформлять чертежи и пояснительную записку.

Выполнение работы требует от студента большой самостоятельности и инициативы, изучения реальных условий работы деталей, исследования соответствия материалов, технологии изготовления и ремонта техническим условиям, изучения специальной литературы, проведения поверочных расчетов и т. д.

Работа выполняется на основе статистических данных по отказам и неисправностям самолетов, вертолетов, двигателей и систем, рабочих чертежей узлов, существующих методов расчетов на прочность, жесткость, износостойкость и т. д.

## **2. СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЕМ**

Несмотря на многообразие неисправностей и отказов, встречающихся при эксплуатации авиационной техники, а следовательно и разнообразие тематики курсовых работ, можно выделить основные этапы, определяющие содержание работ.

1. Изучение конструкции, принципа работы заданного объекта (системы, узла, агрегата) и условий его эксплуатации.
2. Сбор статистических данных по отказам и неисправностям объекта.
3. Обработка и анализ статистических данных. Выбор неисправности для исследования причин ее появления.
4. Проведение исследования.
5. Обобщение результатов исследования и разработка мероприятий по предупреждению появления неисправностей.
6. Оформление и защита курсовой работы.

Курсовая работа состоит из расчетно-пояснительной записки (текстовая часть) и графической части (чертежей), оформленных в соответствии с требованиями ЕСКД.

### **2.1. Требования к оформлению пояснительной записки**

Пояснительная записка должна быть написана от руки чернилами или напечатана на ЭВМ, четко, без помарок, на одной стороне листа (формат А4). Поля страницы не менее: верхнее - 15, левое - 30, правое - 10 и нижнее - 20 мм. Объем пояснительной записки 25—30 страниц. В записке кратко излагается сущность каждого вопроса. Следует избегать многословия, переписывания из учебников и других литературных источников общеизвестных положений.

Примерное содержание и объем пояснительной записки (в страницах):

титульный лист	1
задание	1
реферат	1
содержание	1—2
введение	1
основная часть	15—20
заключение	1
список использованных источников	
приложение	1—3

На титульном листе указываются название кафедры, тема курсовой работы, инициалы, фамилия и группа студента, выполняющего работу, инициалы, фамилия руководителя работы.

Задание оформляется на бланке, выдаваемом кафедрой.

Реферат // должен содержать: сведения о количестве страниц, иллюстраций, таблиц, приложений, использованных источников; сведения о графической части проекта (работы) - количество листов и их формат; перечень ключевых слов; текст реферата.

Содержание представляет последовательное перечисление разделов пояснительной записки с указанием номеров страниц. Содержание составляется на отдельной странице и стоит за рефератом.

Во введении обосновывается актуальность задач, решаемых в курсовой работе.

Основная часть пояснительной записки содержит следующие разделы:

1. Описание конструкции и работы системы (узла).
2. Статистические данные по отказам и неисправностям системы, их анализ и выбор объекта для исследования.
3. Проведение исследования.
4. Обобщение результатов исследования.
5. Разработка и обоснование мероприятий по предупреждению возникновения неисправностей.

При оформлении основной части пояснительной записки следует руководствоваться требованиями /1/.

Заголовки разделов и подразделов отделяются от основного текста сверху и снизу пробелом в две—три строки. Размер абзацного отступа должен быть равен 3—5 буквам.

Формулы, используемые при расчетах, должны иметь ссылку на литературный источник, из которого они взяты, и расшифровку символов в той последовательности, в какой они приведены в формуле. После формулы перед расшифровкой следует поставить запятую, затем с новой строки написать слово «где» (без двоеточия) и вслед за ним обозначение первой величины и через тире его расшифровку. В конце расшифровки ставится запятая, затем обозначение единиц физических величин в системе СИ.

Заканчивается каждая расшифровка точкой с запятой.

При вычислении результата в формулу вместо буквенных обозначений подставляются числовые значения величин и записывается результат вычислений с обозначением единиц физических величин (в системе СИ). Если целесообразно выразить единицы измерения в других системах, то их

следует дать в круглых скобках после обозначения в системе СИ.

Формулы, используемые в тексте пояснительной записки, нумеруются. Допускается нумерация в пределах раздела, например (1.2), (1.3). В этом случае первое число соответствует номеру раздела, второе — номеру формулы внутри раздела.

Таблицы следует помещать после первого упоминания о них в тексте. Таблицы, как и формулы, нумеруются в пределах раздела, например, таблица 5.1. Ссылки на таблицы должны органически входить в текст, а не выделяться в самостоятельную фразу.

Кроме номера, таблице необходим тематический заголовок, например: «Блок нагружения шкворня».

Над продолжением таблицы на новой странице пишут заголовок: Продолжение табл. 5.1 (если таблица на этой странице не кончается) или Окончание табл. 5.1 (если таблица кончается). Тематический заголовок не повторяется.

Вместо названий граф таблицы приводится их нумерация, которую указывают в первой части таблицы.

Иллюстрации размещаются по тексту так, чтобы ими удобно было пользоваться при чтении записки (хотя это требование не обязательно).

Ссылки на иллюстрации приводятся в круглых скобках.

Чертежи и схемы упрощаются, а неупомянутые в тексте детали не изображаются. Желательно чертежи деталей и узлов выполнять в одной проекции.

На графиках координатные оси проводятся одинарными линиями без стрелок на концах, если на них имеются числовые значения масштаба шкал, и со стрелками, если на осях отсутствуют числовые значения. При наличии на координатных осях числовых значений на графике вычерчивается сетка.

Рисунки нумеруются в пределах раздела по порядку (в разделе 1 рисунок 1.1, рисунок 1.2.). Рисунки должны иметь подрисовочную подпись. Например: Рисунок 1.1. Схема нагружения подкоса (а) и шкворня (б).

Если на рисунке проставлены позиции, обозначенные цифрами или буквами по часовой стрелке, то в подрисуночной подписи необходимо дать их расшифровку. Заключение должно содержать краткие выводы и оценку полученных результатов. При наличии в записке большого количества рисунков и таблиц, выполненных на отдельных страницах, их следует поместить по порядку в конце записки (в приложении).

Ссылки на литературные источники следует указывать порядковым номером по списку источников, выделенным двумя косыми чертами.

Список составляется в порядке упоминания ссылки по тексту. Порядок оформления библиографической ссылки:

- 1 — порядковый номер, точка;
- 2 — фамилия и инициалы автора, точка;
- 3 — полное название книги (без кавычек), точка;
- 4 — подзаголовочные данные (номер тома, название и номер сборника, где помещена статья, авторское свидетельство и его номер) и т. п., точка;
- 5 — место издания — город, двоеточие (допускается сокращение городов Москва и Ленинград — М., Л.);
- 6 — название издательства (без кавычек), запятая;
- 7 — год издания (буква «г» опускается), точка;
- 8 — номер (если это журнал), запятая;
- 9 — число страниц, точка;

Пример описания книги: 3. Сухарев И. П. Прочность шарнирных узлов машин. — М.: Машиностроение, 1977.—167с.

Все листы пояснительной записки, включая титульный лист, отдельные рисунки и таблицы должны иметь сквозную нумерацию, расположенную сверху страницы.

Записка закладывается в твердую обложку, на лицевой стороне которой указывается тема курсовой работы, сведения об авторе, год написания.



## *2.2. Содержание и объем графической части работы*

Графическая часть работы содержит:

1. Конструктивный чертёж узла (агрегата, детали) с указанием необходимых размеров, допусков, посадок и топографии неисправности (дефекта).
2. Кинематические и расчетные схемы с указанием параметров действующих нагрузок.
3. Конструктивный чертёж доработанного узла (агрегата, детали).

Объем графической части составляет 1—2 листа формата А1. В отдельных случаях допускается отсутствие чертежей. В этих случаях графическая часть выполняется на миллиметровой бумаге формата листа пояснительной записки.

## **3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ**

### *3.1. Общие положения*

Основой выполнения работы являются материалы, собранные в период прохождения практики, то есть выполнение первых трех этапов курсовой работы.

Согласно теме задания необходимо прежде всего изучить конструкцию, принцип работы, технические характеристики заданной системы и ее элементов и необходимую техническую документацию. Основными источниками для выполнения первого этапа являются технические описания летательного аппарата, инструкции по эксплуатации и техническому обслуживанию и т. д. Непосредственное участие студента в производственном цикле позволит углубить и закрепить знания, полученные при изучении технической литературы.

### *3.2. Сбор статистических данных по отказам и неисправностям*

При сборе материалов следует иметь в виду принятые в ГА термины и определения.

**Неисправность** — отклонение в техническом состоянии изделия, при котором оно не соответствует хотя бы одному из требований, технических условий (ТУ).

**Отказ** — нарушение работоспособности изделия (системы), т. е. такое событие, при котором изделие (система) не способно выполнять заданные функции и для восстановления работоспособности требуется замена всего изделия или его элементов или при котором рабочие параметры изделия вышли за пределы допусков, заданных ТУ, и для восстановления их работоспособности необходима регулировка или выполнение работ, не предусмотренных регламентом технического обслуживания или технологией ремонта.

**Дефект** – каждое отдельное несоответствие изделия требованиям, установленным нормативной документацией.

Данные о неисправностях объекта авиационной техники собираются в АТБ и заводах ГА и МАП в группах учета неисправностей при технических отделах (ТКБ) и ОТК, в группах статистики при отделе главного технолога (ОГТ) или в отделе надежности в виде карточек учета, дефектных ведомостей, квартальных и годовых отчетов, технических отчетов по исследованию причин досрочного снятия двигателей и агрегатов, технических (рекламационных) актов, бюллетеней.

Студенту необходимо самостоятельно ознакомиться с дефектными деталями, выполнить эскизы и составить подробное описание характеристик неисправности. Если дефектные детали отсутствуют, то надо на основании фотографии или опроса инженерно-технического состава указать место расположения и характер дефектов.

### 3.3. Обработка и анализ статистических данных

Статистические данные о неисправностях и отказах необходимо сгруппировать в виде таблицы 3.1.

Таблица 3.1

#### Неисправности системы (узла)

Наименование и шифр узла, агрегата, детали	Характер неисправности	Наработка до отказа		Обстоятельства и способ обнаружения неисправности	Причина неисправности	Классификация неисправности
		С начала эксплуатации (4 пос)	После ремонта (4 пос)			
1	2	3	4	5	6	7

При этом следует иметь в виду, что в графе «Характер неисправности» следует указать физическую сущность явления (события), следствием которого явилось нарушение работоспособности изделия (системы), то есть что именно произошло с узлом (деталью, элементом) и привело к отказу или неисправности изделия (системы). Например: обрыв, трещина, разрушение, износ, заедание, течь и т. д.

В графе «Обстоятельства и способ обнаружения» нужно указать, при каких обстоятельствах возникла неисправность и как она была обнаружена. Например: в полете, при техническом обслуживании и т. д.; визуально или с помощью инструментальных методов контроля.

В графе «Причина неисправности» следует указать, что привело к возникновению неисправности. Например: недостаточная усталостная прочность, потеря физико-механических свойств материала, отсутствие смазки, недостаточная износостойкость и т. д.

Если причина возникновения неисправности неизвестна, то нужно указать несколько наиболее вероятных причин. При этом помощь в установлении причин неисправности может оказать инженерно-технический состав предприятия.

Источниками установления причин появления неисправностей могут быть также технические и рекламационные акты, технические отчеты, бюллетени по доработкам узлов, агрегатов и деталей.

В графе «Классификация неисправности» следует указать, к какой группе относится данная неисправность.

В зависимости от причины возникновения неисправности подразделяются на:

- конструктивно-производственные;
- эксплуатационные;
- ремонтные.

**Конструктивно-производственные неисправности** обусловлены ошибками конструктора, несовершенством примененных методов конструирования, несоответствием материала заданным требованиям, нарушением технологического процесса или его несовершенством.

**Эксплуатационные неисправности** обусловлены нарушением установленных правил эксплуатации или технического обслуживания.

**Ремонтные неисправности** обусловлены низким качеством ремонта, нарушением или несовершенством технологии ремонта.

Статистические данные об отказах и неисправностях следует представить в виде дерева или схемы Исикава (рисунок 1) и провести их анализ [2].

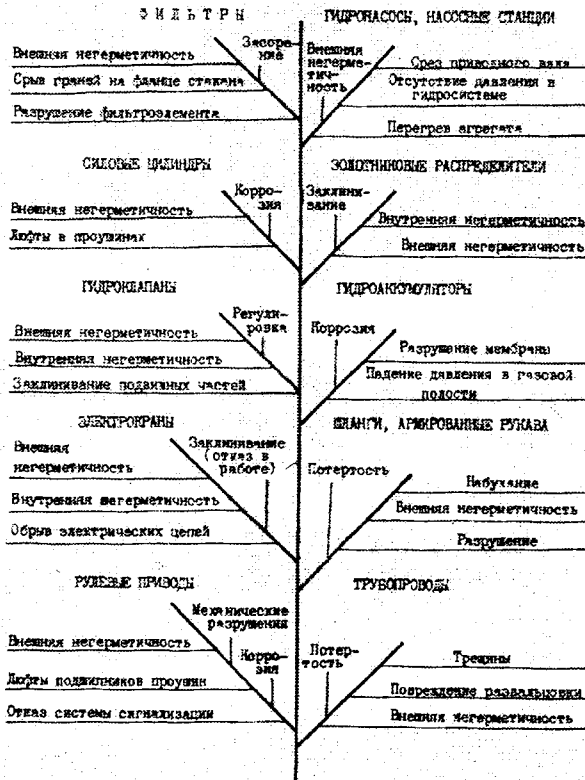


Рисунок 1. Схема Исикава для отказов гидросистемы самолета

Анализ данных заключается в установлении распределения отказов и неисправностей по системам, узлам, агрегатам, видам (трещины, износ, негерметичность) и классификационным группам.

Выявляются ненадежные агрегаты и наиболее часто встречающиеся у них виды неисправностей.

Для наглядности результаты анализа представляются в виде диаграмм Порето (рисунок 2).

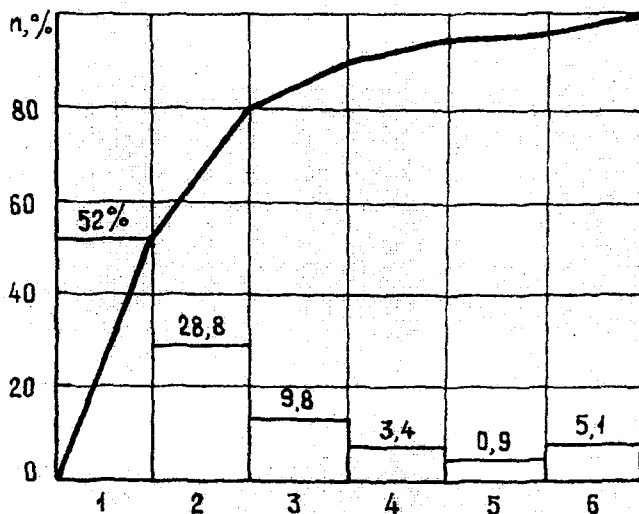


Рисунок 2. Диаграмма Порето для распределения отказов гидросистем по видам :

1-внешняя негерметичность; 2-внутренняя негерметичность; 3-нарушение функционирования агрегата; 4-нарушение элементов агрегата; 5-отказы электрической части электромагнитных кранов; 6-прочие отказы

### 3.4. Выбор объекта для исследования

Из числа деталей, изделий (объектов), на которых в процессе эксплуатации летательного аппарата возникают неисправности, для исследования выбирается один объект (одна неисправность). При выборе объекта необходимо учитывать повторяемость неисправности и степень влияния ее на безопасность полетов.

Целесообразно выбирать такие неисправности объекта, для анализа причин возникновения которых имеются методики проведения поверочных расчетов /3-16/. Это, в первую очередь, относится к неисправностям, связанным с недостаточной прочностью детали.

Сложно, а в некоторых случаях и невозможно провести поверочные расчеты неисправностей, связанные с износом трущихся пар, нарушением работы уплотнений, разрушением деталей сложной формы и т. д. Например, обоснование возникновения трещин в элементах обшивки планера летательного аппарата, так как в этих случаях сложно определить и учесть совокупность влияния различных факторов на механизм возникновения неисправности.

После выбора объекта для исследования необходимо составить описание и топографию неисправности, изучить и описать конструкцию объекта, условия работы и эксплуатации, уровень действующих нагрузок, обстоятельств, при которых возникла неисправность, а также методы ее обнаружения.

При отсутствии чертежей необходимо составить эскизы детали и провести ее обмер. Сведения о материале детали, термообработке, посадках можно получить из альбома основных сочленений летательного аппарата.

Наибольшую сложность при выполнении этого этапа работы представляет изучение эксплуатационных условий работы узла, изделия, детали и величин действующих внешних нагрузок. Ответы на эти вопросы можно получить, изучая специальную техническую литературу, отчеты и труды ГосНИИ ГА, сборники научных трудов вузов по вопросам надежности, прочности и долговечности летательных аппаратов ГА, рекламационные акты и т. д.

Таким образом, в период практики необходимо выбрать объект для исследования, уточнить причину возникновения неисправности, наметить методику исследования и, что очень важно, собрать необходимые сведения об объекте и неисправности для проведения поверочных расчетов.

#### 4. ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование причин возникновения неисправности (отказа) необходимо проводить по схеме, приведенной на рисунке 3.

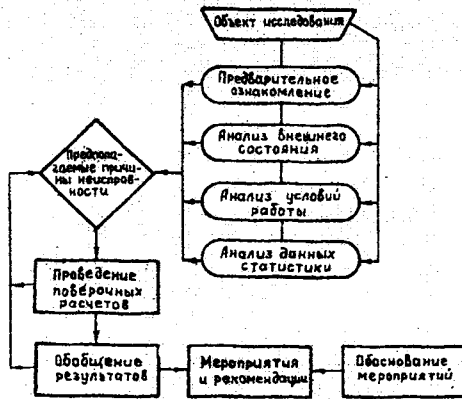


Рисунок 3. Схема для исследования причин возникновения отказов

Предварительное ознакомление с объектом исследования заключается в установлении времени, места, обстоятельств, при которых произошла неисправность, условий эксплуатации и наработки детали в часах (полетах, посадках).

На основании изучения полученных сведений делается предположение о возможных причинах появления дефекта и составляется план проведения исследования.

При определении возможных причин появления неисправности нужно знать количество неисправностей, не было ли доработок дефектных деталей промышленностью или ремонтными организациями.

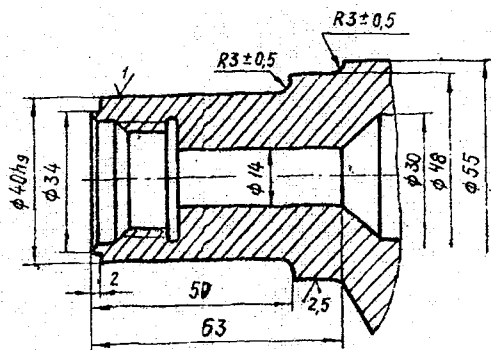
Например, если неисправность появляется вскоре после выпуска изделия заводом - изготовителем, то причиной неисправности можно считать несовер-



шенство конструкции, технологии изготовления узла. Если неисправность появляется при обработке изделием большого количества часов и носит массовый характер, то наиболее вероятной причиной ее появления можно считать недостаточную усталостную прочность, потерю физико-механических свойств материала деталей, неудовлетворительные условия смазки и т. д.

Причиной появления неисправности может быть низкое качество ремонта, если оно выявляется вскоре после ремонта изделий.

Более подробно методы проведения предварительного ознакомления изложены в работах /14,15/



1. Термообработать  $\sigma_s = 1400 - 1500$  МПа
2. Допуски на свободные размеры по  $H_{12}$ ,  $h_{12}$

Рисунок 4. Конструкционный чертёж шкворня

Анализ внешнего состояния производится с целью установления внешних признаков (дефектов изготовления, нарушений условий сборки и эксплуатации), которые могли послужить причинами появления неисправности.

Для этого необходимо иметь дефектную деталь (узел) или ее фотографию с подробным описанием места расположения и характера неисправности.

При анализе внешнего состояния детали путем визуального осмотра или инструментальными методами необходимо выявить признаки, которые могли бы послужить доказательством той или иной причины появления неисправности.

Если деталь разрушилась, то необходимо исследовать характер излома. На основании изучения строения излома можно судить о виде разрушения (статическое, повторно-статическое, усталостное) и его характере (хрупкое, пластическое и т. д.). Необходимые сведения для оценки вида и характера излома даны в работе /17/.

Установление вида и характера разрушения в совокупности со следами износа, коррозии, наклепа, трещинами и другими повреждениями позволяет выявить причину появления дефекта.

Например, на газотурбинном двигателе в процессе его эксплуатации произошло разрушение заднего фланца корпуса соплового аппарата турбины. Исследование строения излома показало, что разрушение носит усталостный характер. При дальнейшем осмотре было установлено также, что на фланце имеются риски от грубой механической обработки и трещины зарождаются по дну этих рисков. Таким образом, результаты исследования внешнего состояния свидетельствуют о недостаточной прочности материала детали, наличии на ее поверхности концентраторов напряжений. Этот вывод подтверждается при проведении поверочных расчетов.

Данных, полученных при исследовании внешнего состояния деталей, оказывается недостаточно для установления истинной причины возникновения неисправности. Необходимо изучить условия работы детали.

**Анализ условий работы** детали включает в себя изучение эксплуатационных, производственно-технологических и конструктивных факторов с точки зрения оценки их влияния на условия нагружения детали и возможности появления перегрузки.

Основой анализа эксплуатационных факторов является изучение и оценка условий эксплуатации и качества технического обслуживания лета-

гельного аппарата.

При изучении условий эксплуатации и качества технического обслуживания необходимо установить наработку изделия с начала эксплуатации, после последнего ремонта и число ремонтов; особенности работы авиационной техники в процессе эксплуатации; какие регламентные работы перед этим выполнялись; какие агрегаты и узлы заменялись и почему.

К эксплуатационным недостаткам, вследствие которых происходят поломки деталей, относятся: эксплуатационная перегрузка деталей (гидравлический удар, раскрутка воздушного винта, грубая посадка и т. д.), чрезмерный износ трущихся деталей, схватывание и заклинивание трущихся поверхностей, перезатяжка или недостаточная затяжка резьбовых соединений, неправильная регулировка зазоров в подвижных соединениях, механические повреждения при сборке, демонтаже и транспортировке. Исследование этих факторов позволяет установить, могли ли они вызвать появление повышенных нагрузок в детали.

Например, при техническом обслуживании двигателя обнаружена течь масла из-под штуцера маслоотстойника. Осмотром было установлено, что в отстойнике сорвана резьба, а грани штуцера под ключ деформированы. На основании этого можно считать, что срез резьбы вызван перезатяжкой штуцера.

При анализе производственно-технологических факторов необходимо установить, не могли ли нарушения технологии изготовления и ремонта явиться причиной неисправности. Для этого следует проверить, соответствует ли деталь чертежу, нет ли на ней дефектов технологического характера (рисок, забоин, закалочных и шлифовочных трещин, заковок и т. д.); соответствует ли характеристика материала требованиям технических условий; качественно ли проведен ремонт.

Если при анализе внешнего состояния установлено, что причина неисправности связана с обнаруженными дефектами металла, то необходимо провести контроль качества материала.

**Качество материала оценивается при проведении стандартных механи-**

ческих испытаний образцов, вырезанных из дефектной детали, металлографических исследований и спектрального анализа. Сведения об испытаниях материалов изложены в работе /18/.

Например, на кронштейне узла крепления двигателя обнаружена трещина. Осмотром выявлены риски от грубой механической обработки в месте образования трещины. При вскрытии трещины было установлено, что излом имеет типичный усталостный характер. Металлографическим анализом в зоне трещины никаких дефектов материала не обнаружено. Механические характеристики материала соответствуют техническим требованиям. На основании этого был сделан вывод, что образование трещины произошло в результате снижения усталостной прочности материала детали из-за наличия концентраторов напряжений в виде рисков. Расчеты подтверждают этот вывод.

Если исследования эксплуатационных и производственно-технологических факторов не дают данных для установления причины неисправности, то необходимо оценить конструктивные факторы с точки зрения их влияния на появление неисправности (дефекта) детали, узла, агрегата.

К конструктивным недостаткам, которые могут вызвать появление неисправности, относятся: неудовлетворительная конструкция узла, неудовлетворительные условия смазки, неправильное назначение допусков и посадок.

О том, что неисправности появляются из-за конструктивных недостатков, свидетельствует повторяемость данной неисправности и доработка конструкции в процессе доводки и эксплуатации изделий.

При исследовании влияния конструктивных факторов на появление неисправности необходимо изучить условия работы, характер нагрузок, напряженное состояние деталей. В случае разрушения или появления усталостных трещин особое внимание следует обратить на наличие конструктивных концентраторов напряжений (отверстий, резьб, галтелей и т. д.).

Анализ данных статистической обработки потока неисправностей производится в случаях, когда неисправность данной детали (узла) имеет массовый

характер. Он заключается в установлении закона распределения потока неисправности, знание которого, как и рассмотренные выше этапы исследования, позволяют высказать предположительно причину возникновения неисправности.

Например, в результате обработки статистических данных установлено, что распределение потока неисправностей детали подчиняется экспоненциальному закону распределения. Это распределение относится к внезапным отказам, которые возникают тогда, когда нагрузка, действующая внутри или вне объекта, превысит допустимую величину. Предположительно причинами появления неисправности в этом случае может служить нарушение правил летной эксплуатации или конструктивные недостатки. Методика обработки статистических данных потока неисправности рассмотрена в работах /19, 20/.

На основании анализа внешнего состояния, условий работы и данных статистики устанавливается предположительная причина возникновения неисправности, которую желательно подтвердить расчетным путем.

**Поверочные расчеты на усталостную прочность** конструктивно - производственных неисправностей необходимо проводить с учетом реальных нагрузок, которые в процессе эксплуатации носят случайный характер и аппроксимируются в виде кривых дифференциальных или интегральных повторяемостей. Сведения об амплитудах и повторяемости нагрузок, действующих на элементы планера летательного аппарата, студент может найти в трудах ГосНИИ ГА, в работах /10-13/ и в методических материалах кафедры.

Расчеты на усталостную прочность выполняются в вероятностном аспекте по методике, приведенной в работе/3/. Пример такого расчета дан в следующем разделе методических указаний.

Исследование влияния конструктивных факторов на нарушение сопряжения деталей заключается в проверке расчетным путем правильности назначения посадки с учетом реальных нагрузок и внешних условий.

При нарушении герметичности нипельных и фланцевых соединений необходимо, исходя из условий работы и внешних нагрузок, рассчитать требуемую величину момента затяжки резьбовых соединений. Примеры таких расчетов приведены в работах /9, 21/.

Проведение поверочных расчетов при исследовании причин появления неисправностей подшипниковых узлов различных элементов летательного аппарата следует проводить по методике, изложенной в работах /15, 22/.

**Заключительным этапом исследования** является обобщение полученных данных и разработка мероприятий по предупреждению появления неисправностей. На этом этапе высказывается окончательное заключение о причине появления неисправности, и приводятся доказательства ее достоверности.

Мероприятия и рекомендации по предупреждению появления неисправности могут предусматривать: улучшение конструкций детали, узла; качества технологии изготовления и ремонта; совершенствование технологии изготовления, эксплуатации; разработку средств контроля с целью своевременного обнаружения неисправных деталей (агрегатов).

Разработанные мероприятия должны быть обоснованы расчетным путем и представлены в виде конструктивных доработок узла, детали, в изменении технологии изготовления, ремонта или технического обслуживания.

## **5. ПРИМЕР ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ШКВОРНЯ**

### **5.1. Предварительное ознакомление с объектом исследования**

При посадке самолета произошло складывание правой стойки шасси. В результате самолет получил серьезные повреждения и пришел в нелетное состояние. На основании анализа повреждений установлено, что первоначально разрушившейся деталью был шкворень крепления подкоса основного шасси. Следовательно, причиной складывания шасси явилось разрушение шкворня по галтельному переходу  $R = 3,0 \pm 0,5$  (рис. 4).

По формуляру было установлено, что к моменту разрушения шкворня самолет совершил 1481 посадку. Учитывая серьезность дефекта, был произведен разовый осмотр всех эксплуатируемых самолетов. В результате осмотра были обнаружены трещины шкворня на 23 самолетах. Длина трещин со-

ставляла 2—15 мм, а наработка — от 20 до 1480 посадок. Средняя наработка до появления трещины равна 795 посадкам. Все трещины проходят по галтельному переходу  $R = 3,0 \pm 0,5$ .

На основании данных, полученных при предварительном ознакомлении с дефектным шкворнем, можно сделать вывод, что причинами его разрушения могут быть:

некачественное изготовление шкворня (дефекты материала, несоответствие геометрических размеров и технологии обработки ТУ); недостаточная конструктивная прочность шкворня; нарушение условий эксплуатации (грубая посадка, чрезмерная затяжка гайки при монтаже подкоса).

### *5.2. Анализ внешнего состояния шкворня*

В результате внешнего осмотра шкворня установлено, что разрушение произошло по сечению  $\varnothing 48$  мм, а излом имеет вид, типичный для усталостного разрушения. Зона начального разрушения представляет собой многочисленные очаги усталости, берущие начало от галтельного перехода  $R = 3,0 \pm 0,5$  мм (рисунок 4). Повреждений шкворня в виде забоин, рисок, царапин в зоне разрушений не обнаружено.

### *5.3. Анализ условий работы шкворня*

Для проверки соответствия размеров разрушившегося шкворня чертежу производились геометрические измерения его и определялись механические свойства материала.

По данным замеров радиус галтели  $R = 2,58$  мм, а диаметры ступеней шкворня соответственно равны  $d=47,85$  мм и  $D=54,8$  мм. Отклонения указанных размеров от чертежа не превышают заданных допусков. Чистота поверхности соответствует чертежу, а профиль резьбы M28x 1,5 удовлетворяет требованиям ГОСТа.

Механические свойства материала определялись путем проведения стандартных испытаний образцов, вырезанных из участков шкворня, прилегающих к зоне излома. Проведенные испытания показали, что образцы имеют  $\sigma_s = 1400—1500$  МПа, соответствующую чертежу.

На наиболее нагруженных витках резьбы деформация, которая могла бы дать основание для предположения о перезатяжке резьбы при монтаже подкоса в АТБ, не наблюдалась.

Документально подтверждено, что затяжка гайки производилась динамометрическим ключом с моментом, соответствующим техническим условиям. Все это свидетельствует о том, что правила монтажа подкоса на шкворень не нарушались.

Изучение записей самописцев за длительный период эксплуатации показало, что вертикальная перегрузка при посадках не превышала эксплуатационную. Следовательно, условия изготовления шкворня и эксплуатации не могли привести к его поломке.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод о том, что наиболее вероятной причиной разрушения шкворня является его недостаточная усталостная прочность. Для доказательства этого предположения необходимо произвести расчет срока службы шкворня и определить вероятность его разрушения по методике, изложенной в работе /3/.

#### **5.4. Расчет вероятности усталостного повреждения шкворня**

Исходные данные для расчета:

1. Конструктивный чертеж шкворня (рисунок 4).
2. Схема нагружения шасси (рисунок 5).
3. Кривая интегральной повторяемости нагрузок, действующих на шкворень за эксплуатационный цикл (руление, разбег, пробег) (рисунок 6).
4. Материал шкворня — легированная сталь, термообработка — изотермическая закалка,  $\sigma_s = 1400—1500$  МПа.



5. Кривая выносливости образца, изготовленного из легированной стали (рисунок 7).

Последовательность расчета:

1. Расчет интегральной повторяемости амплитуд напряжений в исследуемом сечении шкворня.

2. Определение предела выносливости шкворня  $\sigma_{-1\sigma}$ .

3. Определение общего коэффициента вариации  $v_{\sigma-1\sigma}$ .

4. Определение параметров кривой усталости  $m$  и  $N_0$ .

5. Выбор расчетного случая.

6. Определение формы блока нагружения на эксплуатационный цикл.

7. Вычисление величины суммы относительных долговечностей  $a_p$ .

8. Расчет среднего числа блоков нагружения до образования усталостной трещины для медианной вероятности (50%).

9. Вычисление функции долговечности шкворня ( $\lambda_p$ ) и определение долговечности шкворня при заданной вероятности.

#### *5.4.1. Расчет интегральной повторяемости амплитуд напряжений в исследуемом сечении шкворня*

В процессе эксплуатации шкворень амортистойки нагружен силой  $P_n$ , действующей на подкос (см. рисунок 5, а). Интегральное распределение амплитудных значений силы  $P_n$  для одного эксплуатационного цикла приведено на рисунке 6. Это распределение получено в результате обработки 345 осциллограмм тензометрирования усилия в подкосе на этапах руления, взлета и посадки.

Коэффициент вариации усилия  $P_n$  данного распределения  $v_e = 0,105$ .

Преобразуем распределение амплитудных значений сил  $P_n$  по числу циклов в распределение амплитуд напряжений  $\sigma_{\sigma i}$ , действующих в исследуемом сечении шкворня амортистойки, на основании расчетной схемы (ри-

сунок 5, б) и уравнения

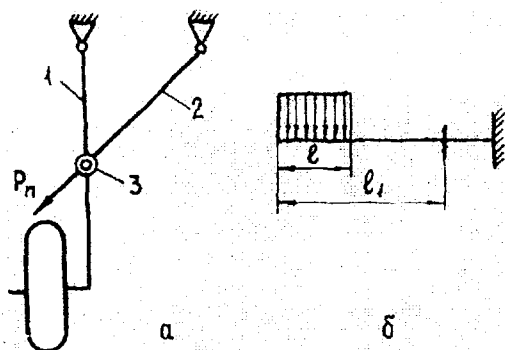


Рисунок 5. Схема нагружения подкоса (а) и шкворня (б):

1 — основная стойка, 2 — подкос, 3 — шкворень

$$\sigma_{ai} = \frac{P_n(h-l/2)}{W}, \quad (5.1)$$

где  $l_1$  — длина шкворня до опасного сечения, м;

$l$  — длина посадочного диаметра шкворня, м;

$W$  — момент сопротивления исследуемого сечения шкворня,  $\text{м}^3$ . Подставив числовые значения в уравнение (5.1), получим

$$\sigma_{ai} = \frac{P_n(0,063 - 0,0225)}{0,1(0,04785 - 0,034)} = 5,70410 P_n (\text{Па}).$$

Задавая 6—10 значениями  $P_n$  по уравнению (5.1), рассчитаем соответствующие значения  $\sigma_{ai}$  и построим зависимость  $\sigma_{ai} = f(N)$  (рисунок 7).

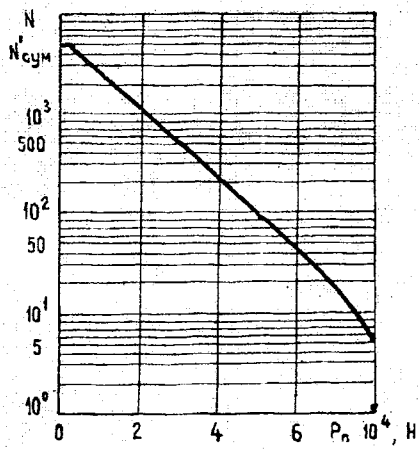


Рисунок 6. Интегральная повторяемость амплитуд нагрузок в подкросе

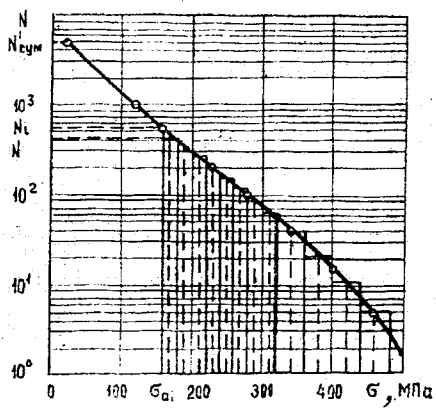


Рисунок 7. Интегральная повторяемость амплитуд напряжений в шкворне и форма блока нагружения

#### 5.4.2. Определение предела выносливости шкворня

Медианное значение предела выносливости  $\sigma_{-1\sigma}$  шкворня при изгибе определяется по формуле работы [3]:

$$\overline{\overline{\sigma_{-1\sigma}}} = \frac{\overline{\overline{\sigma_{-1}}}}{K_{\sigma\sigma}}, \quad K_{\sigma\sigma} = \left( \frac{K_{\sigma}}{\varepsilon_{\sigma}} + \frac{1}{\beta} \right) \frac{1}{\beta_{\text{уп}}}, \quad (5.2)$$

где  $\sigma_{-1}$  — медианное значение предела выносливости образца  $\varnothing 8$  мм по совокупности всех плавок металла данной марки, МПа;

$\sigma_{-1\sigma}$  — медианное значение предела выносливости детали по совокупности всех плавок металла данной марки и возможных в пределах допуска отклонений фактических размеров от номинальных, МПа;

$\beta$  — коэффициент влияния качества обработки поверхности на предел выносливости;

$\beta_{\text{уп}}$  — коэффициент влияния упрочнения на предел выносливости;

$K_{\sigma}$  — эффективный коэффициент концентрации напряжений;

$K_{\sigma\sigma}$  — суммарный коэффициент концентрации напряжений, учитывающий влияние всех факторов;

$\varepsilon_{\sigma}$  — коэффициент влияния абсолютных размеров на предел выносливости.

Значение  $\sigma_{-1} = 740$  МПа находим по кривой, приведенной на рисунке 8. Значение  $K_{\sigma}/\varepsilon_{\sigma}$  определяется по формуле

$$\frac{K_{\sigma}}{\varepsilon_{\sigma}} = \frac{\alpha_{\sigma}}{F\left(\frac{L}{G}, \nu_{\sigma}\right)}, \quad (5.3)$$

где  $\alpha_{\sigma}$  — теоретический коэффициент концентрации напряжений;

$L$  — периметр или часть периметра рабочего сечения детали, прилегающая к зоне повышенной напряженности;

$G$  — относительный градиент первого главного напряжения в зоне концентрации, 1/мм;  $G = \sigma_{\text{max}} \cdot d\sigma/dx$ ;

$v_\sigma$  — постоянная для данного металла величина, определяющая чувствительность к концентрации напряжений и влиянию абсолютных размеров поперечного сечения.

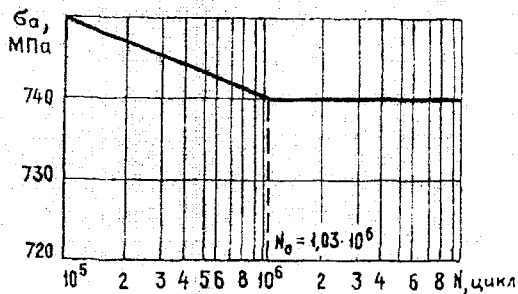


Рисунок 8. Кривая выносливости образца из легированной стали

Так как шкворень представляет собой ступенчатое тело с галтелью, подверженное изгибу, то величину  $\alpha_\sigma = 1,9$  находим по рисунку 9 для значений  $D/d = 54,8/47,85 = 1,15$  и  $\rho/d = 2,58/47,85 = 0,054$ . Значение  $G$  определяется по формуле (18) табл. 9, с. 465 работа /3/.  $G = 2/d + 2,3(1+\varphi)\rho$ , где  $\varphi = 1/(4\sqrt{t/\rho} + 2)$ . Подставив значения  $t = (D-d)/2 = 3,475$  мм,  $\rho = 2,58$  мм,  $\varphi = 0,15$ , получим  $G \approx 1,07$  1/мм.

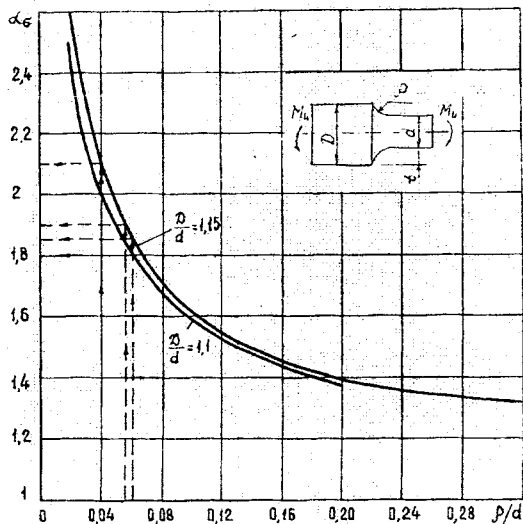


Рисунок 9. Значения  $\alpha_\sigma$  для случая изгиба ступенчатого вала

По рекомендациям работы [3] с. 463 принимаем  $L \approx \pi d/2 = 75,4$  мм,  $\nu_\sigma = 0,08$ . Значение функции  $F(L/G, \nu_\sigma) \approx 1,02$  находим по формуле  $F(L/G, \nu_\sigma) = 0,5[1 + (88,3 - G/L)^{\nu_\sigma}]$  для  $L/G = 70,7$  и  $\nu_\sigma = 0,08$ . Подставив найденные значения  $\alpha_\sigma = 1,9$  и  $F(L/G, \nu_\sigma) = 1,02$  в формулу (5.3), получим  $k_\sigma/\epsilon_\sigma = 1,86$ . По рисунку 4 устанавливаем, что шероховатость поверхности равна 2,5. Такая шероховатость получается при тонком точении. По кривой 3 рисунка 10 для  $\sigma_s = 145 \text{ кг/мм}^2 = 1450 \text{ МПа}$  находим  $\beta = 0,7$ . Известно, что шкворень поверхностному упрочнению не подвергался, поэтому  $\beta_{\text{упр}} = 1$ . Подставив значения  $k_\sigma/\epsilon_\sigma = 1,86$ ,  $\beta = 0,7$ ,  $\beta_{\text{упр}} = 1$  в выражение (5.2), получим  $K_{\text{ад}} = 2,3$ , а

$$\sigma_{-1\sigma} = \frac{740}{2,3} = 323 \text{ МПа}$$

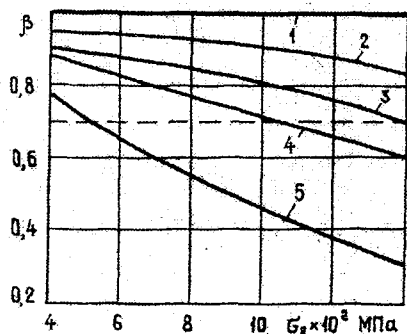


Рисунок 10. Влияние состояния поверхности на предел выносливости:

1 - полирование; 2 - шлифование; 3 - тонкая обточка;

4 - грубая обточка; 5 - наличие окалины

#### 5.4.3. Определение общего коэффициента вариации предела выносливости шкворня

Общий коэффициент вариации  $v_{\sigma-1Д}$  определяется по формуле работы [3]:

$$v_{\sigma-1Д} = \sqrt{v_{\sigma \max}^2 + v_{\bar{\sigma}-1}^2 + v_{\alpha\sigma}^2}, \quad (5.4)$$

где  $v_{\sigma-1Д}$  — коэффициент вариации предела выносливости натурной детали с учетом всех факторов;

$v_{\sigma \max}$  — коэффициент вариации максимального разрушающего напряжения деталей, изготовленных из металла данной плавки в зоне концентрации;

$v_{\bar{\sigma}-1}$  — коэффициент вариации медианных значений пределов выносливости гладких лабораторных образцов по совокупности всех плавки металла

данной марки.

$\nu_{\alpha\sigma}$  — коэффициент вариации теоретического коэффициента концентрации  $\alpha_\sigma$ .

Коэффициент вариации  $\nu_{\sigma_{\max}}$  рассчитывается по формуле работы /3/:

$$\nu_{\sigma_{\max}} = \frac{(1 - 10^{-2S})10^9}{2(\epsilon_\infty \sigma_{-1} + 10^9)}, \quad (5.5)$$

где  $S$  — среднее квадратичное отклонение, характеризующее внутривлажное рассеяние пределов выносливости;

$\epsilon_\infty$  — предельное значение коэффициента влияния абсолютных размеров на предел выносливости при увеличении диаметра гладкого образца при ( $d \rightarrow \infty$ );

$$q = 1,947 \nu_\sigma + \lg(\epsilon_\infty \sigma_{-1}) - \nu_\sigma \lg L/G. \quad (5.6)$$

Ранее нами были найдены значения  $\sigma_{-1} = 740$  МПа,  $\nu_\sigma = 0,08$ ,  $\lg L/G = 1,9$ . По данным работы /3, с. 274/ для легированных сталей  $s = 0,05$ ,  $\epsilon_\infty = 0,5$ .

Подставив в выражения (5.5) и (5.6)  $\sigma_{-1} = 74$  кг/мм<sup>2</sup>,  $s = 0,05$  и  $\epsilon_\infty = 0,5$ , получим  $q = 1,57$ ,  $\nu_{\sigma_{\max}} = 0,051$ .

Влияние отклонений фактических размеров деталей (особенно в зоне концентрации напряжений) от номинальных (в пределах допусков) учитывается с помощью коэффициента вариации  $\nu_{\alpha\sigma}$ .

Коэффициент  $\nu_{\alpha\sigma}$  находим по формуле работы /3/:

$$\nu_{\alpha\sigma} \equiv \left| \frac{d\alpha}{d\rho} \right|_{\rho_0} \frac{\bar{\rho}}{\bar{\alpha}_\sigma} \nu_\rho, \quad (5.7)$$

где  $\left| \frac{d\alpha}{d\rho} \right|_{\rho_0}$  — абсолютное значение производной, которое берется при средних значениях определяющих параметров;

$\bar{\alpha}_\sigma$  — среднее значение  $\alpha_\sigma$ , соответствующее  $\rho = \bar{\rho}$ ;

$\nu_\rho$  — коэффициент вариаций радиуса закругления  $\rho$  в зоне концентрации напряжений детали. Чтобы подсчитать  $\nu_{\alpha\sigma}$ , по рисунку 9 находим значения  $\alpha_\sigma$  при  $D/d = 1,145$  и двух значениях  $\rho/d$ , близких к 0,054, например, при  $(\rho/d)_1 = 0,04$   $\alpha_\sigma = 2,1$ ,  $(\rho/d)_2 = 0,06$ ,  $\alpha_\sigma = 1,85$ .



Приближенное значение производной  $\partial\varphi/\partial\rho$  определяется по уравнению

$$\frac{\alpha_{\sigma_0} - \alpha_{\sigma_1}}{\alpha_{\sigma_2} - \alpha_{\sigma_1}} = \frac{\rho/d - (\rho/d)_1}{(\rho/d)_2 - (\rho/d)_1}, \quad (5.8)$$

подставив в (5.8) соответствующие значения величин, откуда

$$\alpha_{\sigma} = 2,4 - 10\rho/d.$$

Дифференцируя по  $\rho$ , получаем

$$\left| \frac{\partial\alpha_{\sigma}}{\partial\rho} \right|_{\rho_0} = \frac{10}{d} = \frac{10}{47,85}.$$

Принимая закон распределения отклонений радиуса гантели нормальным и считая, что допуск  $\pm 0,5$  мм соответствует  $\pm 3S_p$ , получаем

$$S_p = \frac{0,5}{3} = 0,166,$$

$$v_p = \frac{S_p}{\bar{\rho}} = \frac{0,166}{3} = 0,055.$$

По формуле (5.7) находим:

$$v_{\alpha_{\sigma}} = \frac{10}{47,85} \cdot \frac{2,58}{1,9} \cdot 0,055 = 0,0158.$$

По рекомендациям работы /3, с. 274/принимаем  $v_{\sigma_{-1}} \cong v_{\sigma_{\text{св}}} = 0,08$ .

По формуле (5.4) находим общий коэффициент вариации  $v_{\sigma_{-1}} = 0,110$ .

#### 5.4.4. Определение параметров кривой усталости

Уравнение левой ветви кривой усталости (см. рисунок 8) можно представить в виде

$$N\sigma^m = N_0\sigma_{-1}^m, \quad (5.9)$$

где  $m$  – показатель наклона кривой усталости в двойных логарифмических координатах;

$N_0$  – абсцисса точки перелома кривой усталости.

Поставив в уравнение (5.6) значение  $\sigma_b = 1500$  МПа,  $N = 1$ ,  $N_0 = 1,03 \cdot 10^6$  циклов,  $\sigma_{-1} = 323$  МПа, получим  $1,0 \cdot 1500^m = 1,03 \cdot 10^6 \cdot 323^m$ . Логариф-

мируя, находим  $m = 9$ .

#### 5.4.5. Выбор расчетного случая

Из кривой распределения напряжений в исследуемом сечении шкворня за один эксплуатационный цикл (см. рисунок 7) следует, что суммарное число циклов нагружения составляет  $N'_{\text{сум}} = 5 \cdot 10^3$ .

При средней величине наработки на один отказ 795 взлет-посадок среднее суммарное число циклов нагружения составит  $N_{\text{сум}} = 4 \cdot 10^6$ .

Часть амплитуд напряжения в исследуемом сечении шкворня превышает  $0,5 \bar{\sigma}_{-1k}$  с суммарным числом циклов нагружения меньше  $4,2 \cdot 10^5$ .

В этом случае для оценки долговечности шкворня воспользуемся методом расчета (2-й расчетный случай), основанным на линейном суммировании относительных долговечностей /3, с. 294/:

$$a_p = \sum_{i=1}^r \frac{p_i}{N_i},$$

где  $r$  – номер первого уровня амплитуды, превышающей  $\sigma_{-1k}$ ;

$p_i$  – число циклов нагружения  $\sigma_{i1}$ ;

$N_i$  – число циклов до разрушения при нагружении  $\sigma_{i1}$ .

#### 5.4.6. Определение формы блока нагружения за эксплуатационный цикл

В блоке нагружения необходимо учитывать амплитуды напряжений, превышающие  $0,5 \bar{\sigma}_{-1k}$  (161,5 МПа). Непрерывное распределение  $\sigma_a = f(N)$  заменим ступенчатым, с числом ступеней 12.

Форму блока нагружения зададим в виде табл. 5.1.

Таблица 5.1

## Блок нагружения шкворня

Параметры	Номер ступени i											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\sigma_{s_i}$ , МПа	170	190	210	230	250	270	290	310	344	380	430	460
$v_i$ число циклов	120	108	92	60	40	24	16	12	20	9	8	8

Примечание.  $\sigma_{s_i}$  – среднее значение амплитуды напряжения в i-й ступеньке блока;

$v_i = N_i - N_{i+1}$  – среднее число циклов нагружения амплитудой  $\sigma_{s_i}$ .

Графическое изображение блока нагружения приведено на рис. 7.

## 5.4.7. Вычисление величины суммы относительных долговечностей

$$a_p$$

Значение суммы относительных долговечностей  $a_p$  определим по формуле

$$a_p = \frac{\bar{\sigma}_{\sigma \max \xi} - 0,5\bar{\sigma}_{-10}}{\bar{\sigma}_{\sigma \max} - 0,5\bar{\sigma}_{-10}}, \quad (5.10)$$

где  $\xi = \sum_{i=1}^i (\sigma_{s_i} / \sigma_{s \max}) \cdot t_i$ ,

$t_i$  – относительное число циклов  $\sigma_{s_i}$ , равное  $v_i/v_6$ ,

$$v_6 = \sum_{i=1}^{12} v_i.$$

Результаты расчета коэффициента  $\xi$  корректирования величины  $a_p$  сводим в таблицу 5.2.

Расчет коэффициента  $\xi$ 

Параметры	Номер ступени i					
	1	2	3	4	5	6
$\sigma_{a_i} / \sigma_{a_{max}}$	0,370	0,413	0,457	0,500	0,544	0,587
$t_i$	0,243	0,219	0,186	0,122	0,081	0,049
$\frac{\sigma_{a_i}}{\sigma_{a_{max}}} \cdot t_i$	0,0900	0,0905	0,0852	0,0610	0,0440	0,0286
Параметры	7	8	9	10	11	12
$\sigma_{a_i} / \sigma_{a_{max}}$	0,631	0,675	0,750	0,827	0,915	1
$t_i$	0,033	0,024	0,041	0,018	0,016	0,016
$\frac{\sigma_{a_i}}{\sigma_{a_{max}}} \cdot t_i$	0,0205	0,0165	0,0320	0,0151	0,0148	0,0160

Суммируя значения  $\frac{\sigma_{a_i}}{\sigma_{a_{max}}} \cdot t_i$ , получим  $\xi = 0,5114$ .

Расчет величины  $a_p$  по формуле (5.10) дает  $a_p = 0,254$ .

Так как  $0,254 > 0,2$ , то принимаем  $a_p = 0,254$ .

#### 5.4.8. Расчет среднего числа блоков нагружения до образования усталостной трещины

Среднее число блоков нагружения до разрушения  $\bar{\lambda}$  (образование трещины) определяем по формуле

$$\bar{\lambda} = \frac{a_p \sum_{i=1}^m \sigma_{-1i}^m N_0}{\sum_{i=1}^m \sigma_{a_i}^m v_i}, \quad (5.11)$$

включая в нее только значения амплитуды  $\sigma_{a_i}$ , превышающие предел выносливости шкворня  $\bar{\sigma}_{-1a}$ . Для вычисления  $\sum_{i=1}^m \sigma_{a_i}^m v_i$ , составим таблицу 5.3.

Таблица 5.3

Вычисление  $\sum \sigma_{s_i}^m v_i$ 

Параметры	Номер степени i			
	9	10	11	12
$\sigma_{s_i}$ , МПа	344	380	420	460
$\sigma_{s_i} / \sigma_{s_{\max}}$	0,75	0,827	0,915	1
$v_i$	20	9	8	8
$\sigma_{s_i}^m$	$6,75 \cdot 10^{22}$	$16,52 \cdot 10^{22}$	$40,66 \cdot 10^{22}$	$92,22 \cdot 10^{22}$
$\sigma_{s_i}^m v_i$	$13,49 \cdot 10^{23}$	$14,89 \cdot 10^{23}$	$32,53 \cdot 10^{23}$	$73,78 \cdot 10^{23}$

Суммируя значения нижней строки и подставляя ее в формулу (5.11), получаем

$$\bar{\lambda} = \frac{0,254 \cdot 1,03 \cdot 10^6 \cdot 3,83 \cdot 10^{22}}{134,66 \cdot 10^{23}} = 740.$$

Таким образом, вероятность разрушения шкворня в исследуемом сечении при 740 посадках составляет 50%.

Полученный результат хорошо согласуется со средней величиной наработки 795 посадок на отказ, вычисленный по 23 случаям обнаружения трещин шкворня.

#### 5.4.9. Вычисление функции долговечности шкворня ( $\lambda_p$ ) и определение его долговечности при заданной вероятности

Считая, что распределение эксплуатационной долговечности следует логарифмически нормальному закону, получаем

$$\lg \lambda_p = \lg \bar{\lambda} + U_p S_{\lg \lambda}, \quad (5.12)$$

где  $U_p$  – квантиль нормального распределения, соответствующий вероятности разрушения  $P$ ;

$S_{\lg \lambda}$  – среднеквадратичное отклонение логарифма долговечности.

Значение  $S_{\lg \lambda}$  подсчитывается по формуле

$$S_{\sigma_{\lambda}} = 0,434m \sqrt{v_{\sigma_{\lambda}}^2 - v_{\sigma_{\lambda} \text{ max}}^2}$$

где  $v_{\sigma_{\lambda} \text{ max}}$  – коэффициент вариации  $\sigma_{\lambda \text{ max}}$ , учитывающий условия эксплуатации.

Значение  $v_{\sigma_{\lambda} \text{ max}}$  определяется путем обработки осциллограмм записи  $\sigma_{\lambda \text{ max}}=f(t)$  при эксплуатации самолетов в различных аэропортах, с различными скоростями руления и различными взлетными и посадочными весами. В примере  $v_{\sigma_{\lambda} \text{ max}} = 0,105 = v_{\sigma}$ . Подставляя полученные ранее значения величин  $m$ ,  $v_{\sigma_{\lambda}}$  и  $v_{\sigma_{\lambda} \text{ max}}$ , получаем

$$S_{\sigma_{\lambda}} = 0,434 \cdot 9 \cdot \sqrt{0,11^2 - 0,105^2} = 0,585.$$

Тогда уравнение долговечности (5.12) примет вид  $\lg \lambda_p = 2,864 + 0,585 U_p$ .

Шкворень является ответственной деталью шасси самолета и вероятность его разрушения за ресурс 6000 взлет-посадок должна быть порядка  $P = 10^{-4}$ .

Для вероятности разрушения  $P = 10^{-4}$  по графику, приведенному на рисунке 11, находим  $U_p = -3,73$  и, следовательно, долговечность шкворня в этом случае составит всего 5 посадок.

### 5.5. Обобщение результатов исследования

В результате проведенного исследования установлено, что причиной разрушения шкворня является недостаточная усталостная прочность материала шкворня вследствие неучтенных конструктором при проектировании характера изменения и величин реальных нагрузок.

Для предупреждения появления дефекта необходимо изменить конструкцию шкворня (рисунок 12), что приведет к снижению напряжений в исследуемом сечении. Докажем расчетом, что измененная конструкция шкворня (увеличенное  $W$  сечения) отработает ресурс 6000 посадок с вероятностью разрушения  $P = 10^{-4}$ .

Распределение амплитуд напряжений в исследуемом сечении получим

путем преобразования распределения усилия  $P_n$  (см. рисунок 5) в соответствующие напряжения  $\sigma_{a_i}$  по формуле (5.1):

$$\sigma_{a_i} = 3,27 \cdot 10^3 P_n.$$

Предел выносливости усиленного шкворня  $\bar{\sigma}_{-1D}$  определим по методике, изложенной в п. 5.4.2. Вычислив вначале  $D:d = 55:50 = 1,1$ ,  $r:d = 3.50 = 0,06$ ,  $k_{\sigma D} = 2,27$  и задавшись  $v_{\sigma} = 0,06$ , получим  $\bar{\sigma}_{-1a} = 324,8$  МПа.

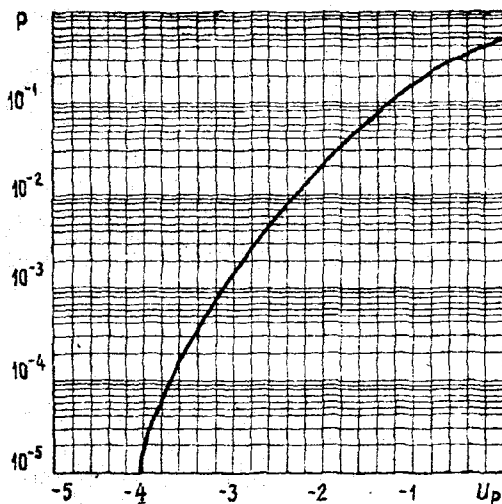
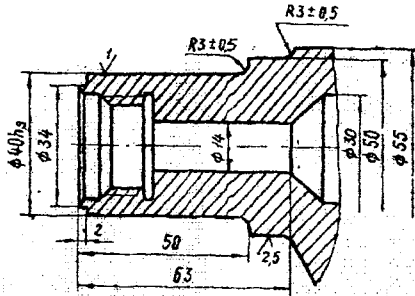


Рисунок 11. Вероятность стандартного нормального распределения:  $P$  – вероятность;  $U_p$  – квантиль нормального распределения



- 1 Термообработка  $\sigma_{\text{т}} = 1400 - 1500 \text{ МПа}$   
 2 допуски на свободные размеры  
 по  $H_{12}$ ,  $h_{12}$

Рисунок 12. Конструктивный чертеж усиленного шкворня

Из кривой распределения  $\sigma_{\text{т}}$  в исследуемом сечении шкворня следует, что напряжение  $\sigma_{\text{а max}} < \sigma_{-10}$  ( $265 < 324,8 \text{ МПа}$ ).

Суммарное число циклов нагружения за ресурс 6000 посадок составит

$$N_{\text{сум}} = 5 \cdot 10^1 \cdot 6 \cdot 10^3 = 3 \cdot 10^7.$$

Для расчета долговечности шкворня в этом случае воспользуемся методом расчета, учитывающим снижение предела выносливости вследствие перегрузок (3-й расчетный случай, с. 295 /3/).

### 5.5.1. Расчет вероятности разрушения

Для расчета вероятности разрушения находим предельный коэффициент нагруженности

$$n_0 = \frac{\sigma_{\text{а max}}}{\sigma_{-1\text{д}}} = \frac{265}{324,8} = 0,816,$$

коэффициент чувствительности к снижению  $\sigma_{-1\text{д}}$  вследствие перегрузок для легированной стали равен  $k = 1,8$  (с. 295) /3/, тогда



$$\frac{kN_{\text{сум}}}{N_0} = 54.$$

На основании обработки данных тензометрирования  $\nu_{\sigma\alpha} = 0,4$ . По этим данным по диаграмме (рисунок 13) находим коэффициент нагруженности  $n_p = 1,5$ . Вычислим относительный коэффициент запаса

$$\bar{n} = \frac{n_p}{n_0} = \frac{1,5}{0,816} = 1,838,$$

а затем квантиль нормального распределения

$$U_p = \frac{1 - \bar{n}}{\sqrt{\nu_{\sigma-1}^2 \bar{n}^2 + \nu_{\sigma\alpha \text{ max}}^2}} = \frac{-0,838}{\sqrt{0,11^2 \cdot 1,838^2 + 0,105^2}} = -3,73.$$

Этому квантилю соответствует вероятность  $P \approx 10^{-4}$  (см. рисунок 12).

Следовательно, доработанный шкворень отработает установленный ресурс.

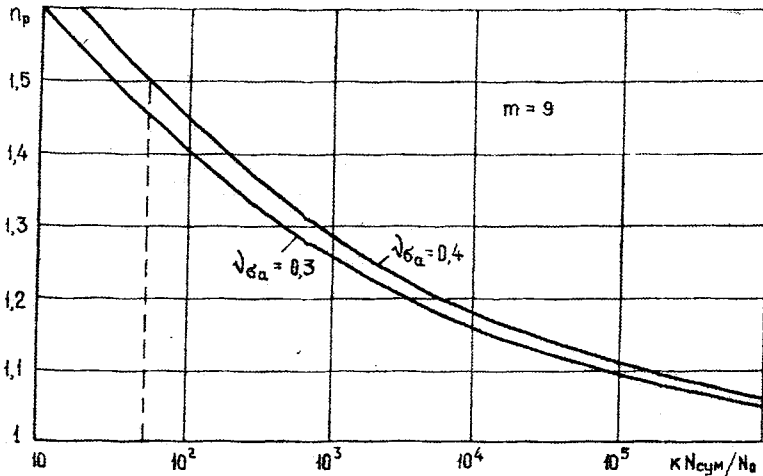


Рисунок 13. Диаграмма для определения  $n_p$  при нормальном законе распределения амплитуд напряжений

### *Список использованных источников.*

1. Стандарт предприятия. СТП СГАУ 6.1.4-97. Общие требования к учебным текстовым документам: Методические указания / Самарский аэрокосмический университет. Сост. отдел стандартизации. Самара, 1997. – 16 с.
2. Надежность гидравлических систем воздушных судов / Т. М. Башта, В. Д. Бабанская, Ю. С. Головки и др. Под ред. Г. М. Башты. – М.: Транспорт, 1986. – 279 с. (надежность и качество).
3. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович В. М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность: Руководство и справочное пособие. Изд. 3-е, перераб. и доп. Под ред. С. В. Серенсена – М.: Машгиз, 1975. – 488 с.
4. Сухарев И. П. Прочность шарнирных узлов машин. – М.: Машиностроение, 1977. – 167 с.
5. Пономарев С. Д., Бидерман В. Л. и др. Расчеты на прочность в машиностроении, т. I, II, III. — М.: Машгиз, 1959. – 384 с., 974 с., 1118 с.
6. Башта Т. М. Машиностроительная гидравлика. – М.: Машгиз, 1971. – 696 с.
7. Биргер И. А., Иосилевич Г. Б. Резьбовые соединения. – М.: Машиностроение, 1973. – 256 с.
8. Кондаков Л. А. Уплотнения гидравлических систем. – М.: Машиностроение, 1972. – 230 с.
9. Сапожников В. М., Лагосюк Г. С. Прочность и испытания трубопроводов гидросистем самолетов и вертолетов. – М.: Машиностроение. 1973. – 248 с.
10. Хазанов И. И., Сакач Р. В., Пейко Я. Н. и др. Эксплуатационная надежность авиационных колес. – М.: Транспорт, 1974. – 224 с.
11. Бойцов Б. В. Надежность шасси самолета. – М.: Машиностроение, 1976.-216 с.
12. Бойцов Б. В. Прогнозирование долговечности напряженных конст-

рукций: Комплексное исследование шасси самолетов. - М.: Машиностроение, 1985. - 232 с.

13. Крылов К. А., Хаймзон М. Е. Долговечность узлов трения самолетов. - М.: Транспорт, 1976. - 184 с.

14. Зайцев А. М. Обеспечение надежной работы деталей авиационных двигателей. - М.: Транспорт, 1971. - 326 с.

15. Зайцев А. М., Корасташевский Р. В. Авиационные подшипники качения. - М.: Оборонгиз, 1963. - 340 с.

16. Решетов Д. Н. и др. Надежность машин: Учеб. пособие для машиностр. спец. вузов / Д. Н. Решетов, А. С. Иванов, В. З. Фадеев. Под ред. Д. Н. Решетова. - М.: Высшая школа, 1988. - 238 с.

17. Фридман Я. В., Гордеева Т. А., Зайцев А. М. Стресс и анализ изломов металлов. - М.: Машгиз, 1960. - 248 с.

18. Шапошников Н. А. Механические испытания металлов. - М.: Машгиз, 1954. - 361 с.

19. Косточкин В. В. Надежность авиационных двигателей силовых установок: Учебник для авиационных специальностей вузов. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1988. - 272 с.

20. Примеры расчета характеристик надежности: Метод. указания / Самарский аэрокосмический университет. Сост. В. А. Кочуров, Г. А. Новиков. Самара, 2003. - 38 с.

21. Ремонт самолетов и авиадвигателей: Метод. указания / Куйбышевский авиационный институт. Сост. И. Г. Старостин. Куйбышев, 1972.

22. Галахов М. А., Бурмистров А. Н. Расчет подшипниковых узлов. - М.: Машиностроение, 1988. - 272 с.

## Содержание

Общие сведения.....	4
1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ.....	5
2. СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЕМ.....	5
2.1. Требования к оформлению пояснительной записки.....	6
2.2. Содержание и объем графической части работы.....	10
3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	10
3.1. Общие положения.....	10
3.2. Сбор статических данных по отказам и неисправностям.....	11
3.3. Обработка и анализ статистических данных.....	12
3.4. Выбор объекта для исследования.....	15
4. ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	17
5. ПРИМЕР ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ШКВОРНЯ.....	23
5.1. Предварительное ознакомление с объектом исследования.....	23
5.2. Анализ внешнего состояния шкворня.....	24
5.3. Анализ условия работы шкворня.....	24
5.4. Анализ условий работы шкворня.....	25
5.5. Обобщение результатов исследования.....	39
Список использованных источников.....	44

Учебное издание

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН НЕИСПРАВНОСТЕЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Методические указания

Составители: *Игонин Николай Николаевич*  
*Новиков Герман Арсеньевич*

*Старостин Иван Григорьевич*

Редактор Т. К. К р е т и н и н а

Подписано в печать 14.10.04. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 2,55. Усл. кр.-отг. 2,67. Уч.-изд. л. 2,75.

Тираж 300 экз. Заказ 69 . Арт. С-41/2004.

Самарский государственный аэрокосмический  
университет. 443086 Самара, Московское шоссе. 34.

---

РИО Самарского государственного аэрокосмического  
университета. 443086 Самара, Московское шоссе. 34.