

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ  
Киевский институт инженеров гражданской авиации

На правах рукописи

АЙЗЕНБЕРГ БОРИС ЕФИМОВИЧ

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОБШИВОК  
ПАНЕЛЕЙ ПЛАНЕРА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ, ИМЕЮЩИХ  
КОРРОЗИОННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ.

Специальность 01.02.06 "Динамика, прочность машин  
приборов и аппаратуры."

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук.

Киев КИИГА 1992

621.01  
681.2

ЛНБ ім. В. Стефаніка



00330801 (F)

Работа выполнена на кафедре полетов и прочности летательных аппаратов Киевского института инженеров гражданской авиации.

- Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент Радченко А. И.
- Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор Кордонский Х. В.
- кандидат технических наук, доцент Жданович М. П.

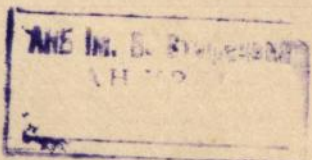
Ведущее предприятие - АПГК им. О. К. Антонова

Защита состоится "13" ноября 1992 года в 15 часов на заседании специализированного Совета К 072.04.01 по специальности 01.02.06 "Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры" в Киевском институте инженеров гражданской авиации, 252068, Киев-58, Комарова, 1, КИИГА.

О диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КИИГА. Автореферат разослан "12" октября 1992 года.

Ученый секретарь специализированного Совета, к. т. н., доцент

/Ю. А. Лебедев/



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время одной из наиболее актуальных задач гражданской авиации (ГА) является обеспечение эксплуатации и ремонта авиационной техники (АТ) по ее техническому состоянию. При этом возникает необходимость оптимизации ресурсов и сроков службы различных конструктивных элементов (КЭ), в зависимости от характера повреждений, возникающих на них в процессе эксплуатации.

Одним из наиболее массовых повреждений элементов конструкции планера воздушных судов (ВС) является коррозия, развитие которой обусловлено не только термодинамическими и физико-химическими свойствами металла, но и неуклонным увеличением ресурсов и сроков службы АТ.

В этой связи, возникают вопросы оценки предельно-допустимой величины коррозионных повреждений различных КЭ, разработки методов прогнозирования величины развития этих повреждений на планируемую наработку или срок службы, а также разработки и изготовления объективных диагностических средств для оперативного определения глубины коррозионных повреждений с требуемой точностью.

Решение этих вопросов требует комплексного подхода, который до настоящего времени в научно-исследовательских организациях и предприятиях ГА не был реализован.

Настоящая работа направлена на решение этих, очень актуальных вопросов, имеющих большое практическое значение для предприятий ГА.

Цель работы и задачи исследования. Целью настоящей работы является разработка методов оценки и прогнозирования долговечности, поврежденных коррозией обшивок панелей планера воздушных судов.

Основные задачи исследования:

1. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния коррозионного повреждения на усталостную прочность конструкции.

2. Создание системы сбора и обработки статистической информации о коррозионных повреждениях обшивок панелей планера воздушных судов в процессе эксплуатации.

3. Разработка вероятностных моделей изменения технического состояния обшивок панелей планера ВС, имеющих коррозионные повреждения и прогнозирование их долговечности.

4. Совершенствование существующего технологического процесса ремонта обшивок панелей планера ВС при наличии коррозионных повреждений.

## 5. Практическое внедрение результатов работы.

Научная новизна работы. Разработан комплексный метод оценки и прогнозирования долговечности элементов конструкции, имеющих коррозионные повреждения, который включает:

экспериментальные (ускоренные, лабораторные коррозионно-усталостные испытания) и теоретические (расчет на статическую прочность с учетом утонения обшивки из-за коррозии) исследования влияния коррозионных повреждений на усталостную прочность элементов конструкции;

оценку и прогнозирование долговечности различных элементов конструкции планера ВС, имеющих коррозионные повреждения с использованием вероятностно-статистического метода;

объективный и оперативный контроль за величиной коррозионных повреждений с помощью диагностических средств.

Установлены зависимости влияния конструктивно-технологических особенностей и климатических условий эксплуатации на интенсивность развития коррозионных повреждений.

Практическая ценность и реализация работы. Полученные результаты усталостных исследований и разработанный вероятностно-статистический метод расчета скорости развития коррозионных повреждений позволили обосновать возможность увеличения ремонтных допусков. При этом изменен подход к определению предельно-допустимой величины коррозионных повреждений. Взамен существовавших ранее допусков на коррозионные повреждения, которые практически не учитывали допуски на толщину листа при его изготовлении (эти величины могли превышать установленные ремонтные допуски), допуски, принятые в ходе выполнения настоящей работы, жестко связаны с остаточной толщиной листа.

Внедрение в производство разработанного ультразвукового прибора позволило обеспечить надежный контроль наличия коррозионных повреждений и их параметров (глубины) с требуемой точностью.

Разработанный вероятностно-статистический метод анализа и прогнозирования развития коррозионных повреждений и программное обеспечение для оперативной обработки информации, позволяют обеспечить ритмичность ремонтного производства за счет своевременного определения потребности материальных и трудовых ресурсов при ремонте ВС, корректировки графика ремонта. Данный метод также позволяет выделить вид определяющей наработки КЭ для различного вида неисправностей и определять для этих элементов соответствующие ресурсы.

Все полученные результаты настоящей работы внедрены на заводах NN 403, 410, 412 ГА, а разработанный ультразвуковой прибор для

контроля и измерения коррозионных повреждений КЭ рекомендован ГосНИИ ГА и АНТК им. О. К. Антонова для всех эксплуатационных и ремонтных предприятий ГА, где он уже частично внедрен. Кроме того в ГосНИИГА и АНТК им. О. К. Антонова внедрена разработанная методика прогнозирования развития коррозионных повреждений элементов конструкции планера, используемая при установлении ресурсов и сроков службы ВС.

Апробация работы. Основные положения работы обсуждены на двух всесоюзных и трех отраслевых научно-технических конференциях.

Публикация. По теме диссертации опубликовано десять печатных работ.

Объем работы. Работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 156 наименований, 6 приложений. Работа изложена на 156 страницах машинописного текста, содержит 53 рисунков и 14 таблиц.

Содержание работы. Вводная часть работы отмечает практическую важность проблемы оценки и прогнозирования развития коррозионных повреждений КЭ, определения долговечности этих элементов и необходимость объективного контроля наличия и параметров коррозионных повреждений.

В первой главе проведен обзор работ, посвященных возникновению и развитию коррозии на элементах конструкции ВС. При этом отмечается, что коррозия КЭ - неизбежное следствие эксплуатации. Процесс окисления металла, т. е. процесс превращения его в окисел, обусловлен термодинамически. Это значит, что реакция окисления металлов в обычных условиях давления и температуры протекает самопроизвольно.

Рассмотрены виды коррозионных повреждений конструктивных элементов ВС с учетом особенностей их конструкции.

Анализ существующего технологического процесса ремонта обшивки фюзеляжа, имеющей коррозионные повреждения, позволил определить ряд недостатков, значительно снижающих его эффективность. К таким недостаткам, прежде всего, следует отнести выбор ремонтных допусков без учета колебаний толщины листа при его изготовлении и отсутствие объективных средств диагностики.

Рассмотрены вопросы определения долговечности, оценки и прогнозирования развития коррозионных повреждений КЭ планера.

Отмечен большой вклад в развитие исследований усталостной прочности элементов конструкции (в том числе и коррозионной усталости) и статистических методов обработки результатов таких ученых, как Гведенко Б. В., Степнов М. Н., Ивацова В. С., Карлашов А. В., Ко-

гаев В. П., Кордонский Х. В., Павлов И. Г., Писаренко Г. С., Радченко А. И., Рычик В. П., Серенсен С. В. и др.

На основании проведенного анализа литературных данных сформулированы основные цели и задачи исследования.

Во второй главе изложена методика проведения исследований влияния коррозионных повреждений на усталостную долговечность обшивки фюзеляжа, основанная на программе сравнительных статических и усталостных испытаний конструктивных элементов, каждый из которых представляет собой участок обшивки соединенный со стрингером (рассматриваются как клеесварные соединения, так и заклепочные). Все конструктивные элементы вырезались из панелей фюзеляжа самолетов Ан-24 после длительной эксплуатации и имеющих коррозионные повреждения, которые явились причиной замены обшивок.

Из замененных в процессе ремонта панелей подпольной части фюзеляжа вырезались образцы двух типов:

I-элемент клеесварного соединения "обшивка-стрингер";

II-элемент заклепочного соединения "обшивка-стрингер".

Размеры образцов конструктивных элементов :

ширина-86мм, длина-200мм. Материал обшивки-Д16АТВ; материал стрингера-ПР102-35 Д16АТ.

Усталостные испытания конструктивных элементов проводились в два этапа:

I этап-повторно-статическое нагружение с частотой  $\nu=0,2$  Гц до достижения заданной базы  $N_f=60000$  циклов;

II этап-циклические нагружения с частотой  $\nu=11$  Гц до полного разрушения образцов (на базе  $10^6$  циклов, для ускорения испытаний).

Циклические напряжения на I и II этапах были равны.

При расчете напряжений исходили из требований к нагруженности исследуемых образцов, содержащихся в Программе Разработчика основного изделия.

Погонная нагрузка -  $q_{\max}=90$  кг/см;  $q_{\min}=0$ .

Максимальное напряжение  $\sigma_{\max} = 7,826$  кг/мм<sup>2</sup>.

Следует отметить, что на первом этапе имитировались условия реальной эксплуатации, когда один цикл нагружения соответствовал одному полету самолета. При этом отрабатывался максимально-возможный, назначенный в дальнейшем, ресурс-60000 полетов. Ускоренные испытания, выполненные на втором этапе, позволили установить фактическую долговечность образцов с различной величиной коррозионного повреждения.

Несмещенность оценок на I и II этапах обеспечивалось за счет того, что циклические напряжения на этих этапах были равны.

Для повторно-статического нагружения использовалась стандартная машина ГРМ-1, специальная доработка которой позволила проводить испытания при низкой частоте 12 циклов/мин. Использовалось многозахватное приспособление, позволяющее производить крепление в каждой паре захватов одновременно четырех последовательно соединенных конструктивных элементов. Таким образом одновременно испытывалось 32 образца. В случае разрушения одного из образцов испытания могли быть автоматически остановлены.

После отработки заданной базы испытаний последовательные соединения конструктивных элементов демонтировались и испытания велись при значительно большей частоте. С этой целью использовалась стандартная испытательная машина МУП-50.

Для исследования вида и характера коррозионных повреждений использовались металлографические и фратографические методы. Соответственно методам исследования использовались металлографический микроскоп ММП-4 с увеличением  $\times 50$ ,  $\times 100$ ,  $\times 400$  и электронный растровый микроскоп JSM-35.

Расчет статической прочности выполнен на ЭВМ по программе "CAPAS", принятой Разработчиком основного изделия. Особенностью данного расчета является то, что он выполнен с учетом утонения обшивки из-за коррозии.

Методика проведения вероятностно-статистического исследования включает выбор объектов исследования, систематизацию получаемой статистической информации, выбор вероятностных моделей, схемы и последовательности обработки статистической информации.

В третьей главе рассматривается случайный процесс появления и развития коррозии на элементах конструкции.

Для всестороннего статистического анализа необходима объективная информация о фактическом состоянии КЭ в процессе эксплуатации.

Качество исходной информации для проведения анализа определяет выбор вероятностно-статистической модели. В работе рассмотрены статистические данные, полученные при последовательном выполнении ремонтов самолетов Ан-24 на заводах ГА.

Статистическая информация включала в себя сведения о наработках и сроках службы изделий, о климатических условиях их эксплуатации, о зонах расположения коррозионных повреждений и их параметрах, о методах устранения коррозионных повреждений.

Полнота и качество статистической информации о коррозионных повреждениях различных элементов конструкции определялась в зависимости от влияния этих элементов на надежность изделия.

Так, для силовых элементов крыла (в частности, центроплана) фиксируются все очаги коррозии с указанием координат расположения и параметров (длины, ширины, глубины) каждого такого очага на элементе конструкции.

Что касается обшивок панелей подпольной части фюзеляжа, для которых характерны многочисленные коррозионные повреждения, в том числе и коррозионные точки в местах клеесварки, расположенные на значительной площади, то здесь учет параметров каждого очага затруднен. В этом случае приходится фиксировать коррозионное состояние элементов конструкции в зависимости от вида работ, выполняемых по устранению этих повреждений на данном КЭ.

Рассматриваются следующие состояния:

- 0 - коррозия не обнаружена;
- 1 - коррозия требует зачистки КЭ;
- 2 - коррозия требует замены КЭ.

Изменение этих состояний от ремонта к ремонту можно представить в виде следующих переходов: 01; 02; 11; 12; 21; 22. При этом первая цифра в таких парах соответствует состоянию КЭ в предыдущем ремонте (последнее, выявленное в предыдущих ремонтах, состояние), а вторая цифра - соответствует состоянию КЭ в момент очередного ремонта (момент обнаружения очередного состояния).

Рассмотренные состояния и переходы можно представить в виде следующей матрицы переходов (в скобках указаны соответствующие каждому переходу вероятности):

Было Ста- ло	0	1	2
0	00 (P <sub>00</sub> )	01 (P <sub>01</sub> )	02 (P <sub>02</sub> )
1	10 (P <sub>10</sub> )	11 (P <sub>11</sub> )	12 (P <sub>12</sub> )
2	20 (P <sub>20</sub> )	21 (P <sub>21</sub> )	22 (P <sub>22</sub> )

Описанная выше ситуация отвечает марковской схеме переходов (рис. 1)

Рассматриваемый марковский процесс изменения состояний является неоднородным во времени. Иначе говоря, вероятности перехода

зависят от наработки панелей с начала эксплуатации. Это связано с тем, что коррозия может появиться в одной и той же зоне, но уже вне отремонтированного участка обшивки.

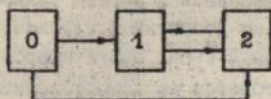


Рис. 1. Схема переходов

Пусть  $T_j, T_{j+1}$  - наработки при  $j$ -м и  $j+1$ -м ремонтах. Пусть при ремонте  $j+1$  обнаружена коррозия, подлежащая устранению. Пусть  $\tau$  - наработка до появления коррозии. Тогда имеет место неравенство:

$$T_j < \tau < T_{j+1} \quad (1)$$

При этом предполагается, что в момент  $T_j$  - коррозия не обнаружена.

Таким образом, наблюдения представляют собой совокупность неравенств:

$$\tau \leq T_1, \quad (2)$$

$$T_j < \tau \leq T_{j+1}, \quad (3)$$

$$\tau > T_{j+1}, \quad (4)$$

где  $T_1$  - наработка до первого ремонта и неравенство (2) означает, что коррозия обнаружена при первом ремонте;

неравенство (4) означает, что коррозии не было при последнем  $j+1$ -м ремонте.

Учитывая отмеченные особенности информации о коррозионных повреждениях, были рассмотрены две вероятностно-статистические модели, наиболее близкие к рассматриваемому явлению: модель логарифмически-нормального распределения и модель распределения Вейбулла.

Как уже отмечалось, имеются существенные различия в характере и качестве информации о коррозионных повреждениях центроплана и подпольной части фюзеляжа.

Если коррозия развивается в фиксированном месте конструкции (одноочаговая), то при выборе закона распределения необходимо учитывать, что по мере развития коррозионных повреждений, скорость накопления повреждений уменьшается. Это связано с тем, что продукты коррозии являются защитой от проникновения окисляющей среды. Известно (Кордонский Х. Е., Серенсен С. В.), что в этой ситуации, физика явления отвечает логарифмически-нормальному распределению.

При многоочаговой коррозии обшивок панелей подпольной части фюзеляжа, когда предельное состояние КЭ определяется очагом, имеющим наибольшие параметры повреждения, то этой ситуации отвечает распределение Вейбулла (так называемая модель "слабого звена"). Действительно, пусть  $l$  - предельно-допустимая глубина коррозии, а  $\tau_i$  - время достижения этой глубины в  $i$ -ом очаге коррозии. Тогда наработка панели, при которой требуется ее ремонт, запишется как

$$\tau_i = \min(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k), \quad (5)$$

где  $k$  - число точек коррозии. Поскольку  $\tau_i$  взаимно независимы и коррозионные очаги примерно одинаковы (в статистическом смысле), то, при относительно большом  $k$ , величина  $\tau_i$  будет иметь распределение Вейбулла. Применительно к панелям подпольной части фюзеляжа величина  $k$  может достигать несколько десятков.

Оценивание параметров распределения Вейбулла для каждого из переходов матрицы выполняется по методу максимального правдоподобия, которое в данном случае имеет вид:

$$L(\theta_1, \theta_2) = \prod_{i=1}^{k_1} F(\tau_j^{(i)}) \prod_{i=1}^{k_2} (F(\tau_{j+1}^{(i)}) - F(\tau_j^{(i)})) \prod_{i=1}^{k_3} (1 - F(\tau_{j+1}^{(i)})), \quad (6)$$

где  $i$  - номер объекта,  $k_1 + k_2 + k_3 = N$  - объем выборки.

При расчетах, для поиска параметров распределения использовался метод непосредственного оценивания функции максимума правдоподобия  $\max L(\theta_1, \theta_2)$  по параметрам  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , которые, при соответствующей записи распределения Вейбулла, являются параметрами сдвига и масштаба.

Так как в результате расчетов необходимо было получить переходные вероятности  $P_{ij}$ , то произведение правдоподобия  $L(\theta_1, \theta_2)$  вычислялись раздельно по каждому переходу из состояния в состояние.

При установлении ресурсов, необходимо определить вид исчисления наработки, оказывающей наибольшее влияние на развитие повреждений.

Определяющая коррозию наработка выявлялась на основе минимума коэффициента вариации наработки до появления коррозии.

Для распределения Вейбулла минимум коэффициента вариации отвечает максимуму параметра  $\alpha$ . Это связано с тем, что коэффициент вариации наработки для распределения Вейбулла есть

$$v(\tau) = \frac{\sigma(\tau)}{E(\tau)} = \frac{\sqrt{\Gamma(1 + \frac{2}{\alpha}) - \Gamma^2(1 + \frac{1}{\alpha})}}{\Gamma(1 + \frac{1}{\alpha})} \quad (7)$$

где  $\Gamma(\cdot)$  - полная гамма-функция,

$E(\tau)$  - математическое ожидание величины  
 $\sigma(\tau)$  - среднее квадратическое отклонение величины

Для логарифмически-нормального распределения минимум коэффициента вариации отвечает минимуму среднего квадратического отклонения  $\sigma_L$ . Коэффициент вариации для логарифмически-нормального распределения определяется по формуле:

$$v(\tau) = \sqrt{e^{\sigma_L^2} - 1} \quad (8)$$

В этой связи проводилась статистическая обработка данных во всех трех шкалах (календарный срок службы, летные часы, число полетов) и за определяющую наработку принималась шкала, в которой параметр  $A$  (для распределения Вейбулла) оказывался наибольшим, а параметр  $\sigma_L$  - наименьшим (для логарифмически-нормального распределения). Статистический анализ показал, что в качестве определяющей наработки для подпольной части фюзеляжа выступает число полетов. Физически это объясняется осаждением конденсата в подпольной части фюзеляжа за счет перепада температур при взлетах и посадках ВС.

Для центроплана выяснилось, что определяющей наработкой являются летные часы или календарное время эксплуатации. Различие коэффициентов вариации в этих шкалах было незначительным.

Для определения интенсивности развития коррозии от состояния к состоянию для панелей подпольной части фюзеляжа были получены отечальные этим состояниям оценки параметров Вейбулла,  $\bar{a}_{01}$ ,  $\bar{b}_{01}$ ,  $\bar{a}_{11}$ ,  $\bar{b}_{11}$  и т. д.

Располагая указанными оценками, можно получить оценки максимума правдоподобия для математических ожиданий и квантилей соответствующих распределений  $\tau_i$ . Так, например, математическое ожидание  $E(\tau)$  для состояния 01 выразится как

$$E(\tau_{01}) = b_{01}^{1/a_{01}} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{a_{01}}\right) \quad (9)$$

Квантиль уровня  $\varepsilon$  для состояния 01 выразится как решение уравнения:

$$1 - e^{-\frac{T_\varepsilon^{a_{01}}}{b_{01}}} = \varepsilon, \quad (10)$$

где  $T_\varepsilon$  - квантиль.

Это позволяет построить графики развития коррозии от состояния к состоянию (рис. 2, 3, 4).

Таким образом,зная среднее время ( $T_{cp.}$ ) перехода из одного состояния в другое и среднюю глубину коррозии ( $\bar{V}_{cp.}$ ) в конечном состоянии,можно определить среднюю скорость роста ( $V_{cp.}$ ) глубины коррозии:

$$V_{cp.} = \bar{V}_{cp.} / T_{cp.} \quad (11)$$

Вероятности переходов состояний вычисляются по распределению Вейбулла,где оценками параметров являются оценки максимального правдоподобия.

На основании полученных вероятностей для каждого перехода,выполнялся прогноз потребности КЗ в ремонте. Прогноз произвoдился по двум схемам:

- 1)расчет вероятностей перехода из одного состояния в другое,
- 2)расчет вероятностей появления коррозионных повреждений при заданной наработке с начала эксплуатации.

Используя формулы биномиального закона распределения для ожидаемого в ремонт числа самолетов с коррозионными повреждениями,рассчитывается среднее число самолетов с повреждениями и квантильное значение,отвечающее уровню вероятности 0,9986.

В четвертой главе представлены результаты исследований по прогнозированию долговечности элементов конструкции планера, имеющих коррозионные повреждения,а также практическое использование полученных,в ходе выполнения работы,результатов.

Подпольная часть фюзеляжа состоит из семи технологических панелей. Группируя все конструктивные ячейки (конструктивная ячейка - участок обшивки панели,заключенный между двумя смежными шпангоутами и двумя смежными стрингерами) по принципу равновероятного возникновения в них указанных выше состояний, в диапазоне одних и тех же наработок (номеров ремонта),было выделено 11 зон с различной степенью развития коррозии.

Развитие коррозии на обшивках можно представить графически в координатах: состояние - число полетов,где под состоянием понимается изменение глубины очага коррозии,соответствующее зачистке или замене обшивки. Для этой цели используются значения квантилей и средних наработок,которые определялись в главе 3.

Для определения влияния различных факторов на развитие коррозии был выполнен анализ влияния зоны конструкции и конструктивно-технологических особенностей изготовления,анализ влияния климатических условий эксплуатации (рис. 2,3,4).

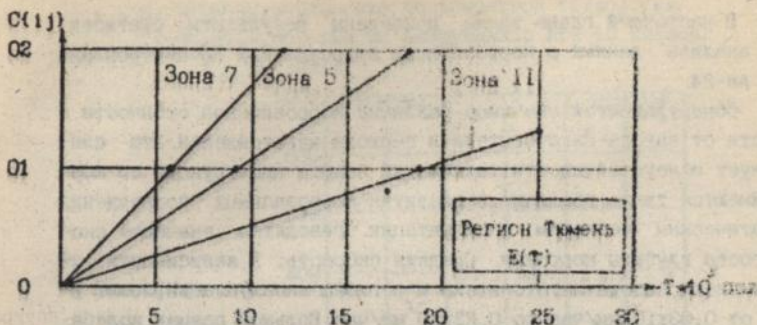


Рис. 2. Влияние зоны конструкции на ее долговечность

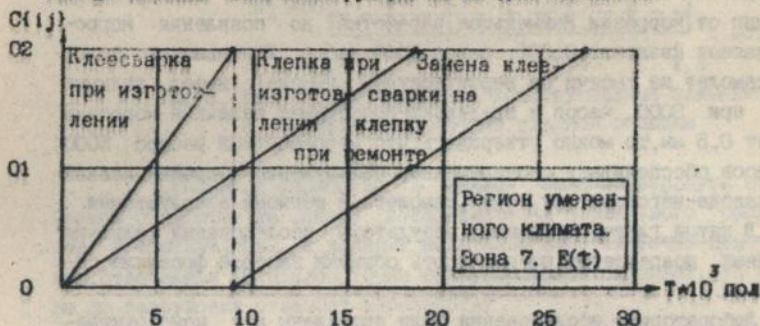


Рис. 3. Влияние конструктивно-технологических изменений на долговечность конструкции

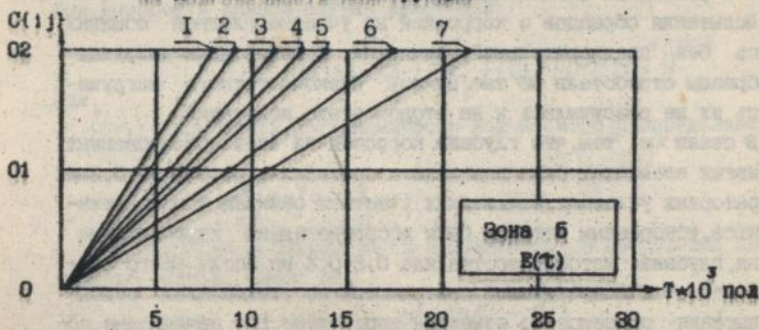


Рис. 4. Влияние региона эксплуатации на долговечность конструкции. Условные обозначения: 1 - Ашхабад; 2 - Астрахань; 3 - Гурьев; 4 - Киев; 5 - Регион умеренного климата; 6 - Тимень; 7 - Якутск

В настоящей главе также приведены результаты статистического анализа данных о коррозионных повреждениях КЭ центроплана самолета Ан-24.

Обнаруживается значимое различие коррозионной стойкости в зависимости от завода-изготовителя и периода изготовления. Это свидетельствует о неустойчивости технологии защиты конструкции от коррозии. Имеются также различия в развитии коррозионных повреждений во климатических регионах эксплуатации. Приводятся значения скоростей роста глубины коррозии. Средняя скорость, в зависимости от серии самолета, завода-изготовителя и региона эксплуатации, лежит в пределах от  $0,06 \times 10^{-3}$  мм/час до  $0,22 \times 10^{-3}$  мм/час. Большой размах колебаний средней скорости свидетельствует о слабой защищенности конструкции от коррозии. Наименьшая наработка до появления коррозии, отвечающая квантилю 0,001, равна 3000 часов. Учитывая, что только один самолет из тысячи (в вероятностном смысле) имеет видимую коррозию при 3000 часов и предельно-допустимая величина коррозии составляет 0,5 мм, то можно утверждать, что межремонтный ресурс 5000 летных часов обеспечивает своевременное обнаружение коррозии независимо от завода-изготовителя, серии самолета и региона эксплуатации.

В пятой главе изложены результаты исследования влияния коррозионных повреждений на прочность обшивки панелей фюзеляжа самолета Ан-24.

Лабораторные исследования были проведены для конструктивных элементов с коррозией на участке гладкой обшивки, клеесварных соединений и ремонтных заклепочных соединений.

Испытания образцов с коррозией на участке гладкой обшивки проводились без предварительной зачистки коррозионных повреждений. Все образцы отработали 60 тыс. циклов низкочастотного нагружения, а часть их не разрушилась и на втором этапе испытаний.

В связи с тем, что глубина коррозии на всех обследованных конструктивных элементах была невелика и составляла от 0,1 до 0,2 мм, то в лабораторных условиях, на гладких участках обшивки конструктивных элементов, ускоренным методом были воспроизведены коррозионные повреждения, глубина которых составляла 0,2-0,4 мм. После этого производилась зачистка поврежденной поверхности по технологии ремонта и испытания образцов по принятой выше схеме. Все зачищенные образцы имели долговечность более  $10^6$  циклов.

Результаты испытаний элементов гладкой обшивки показаны на рис. 5, где приняты следующие обозначения:

— образцы с незначительной эксплуатационной коррозией;

- - образцы, защищенные по ремонтной технологии.  
 † - образцы, которые не разрушились при  $10^6$  циклов.  
 $N_{\Sigma}$ , тыс. цикл.

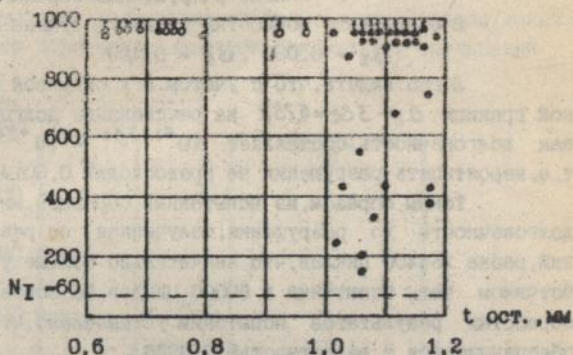


Рис. 5. Результаты испытаний конструктивных элементов с коррозией на участке гладкой обшивки

Суммарная наработка в циклах была подвергнута статистической обработке на основе логарифмически-нормального распределения. В соответствии с данными испытаний имеется точка цензурирования, отвечающая  $10^6$  циклов. Точка цензурирования означает, что наработка до разрушения отвечает неравенству

$$\tau > 10^6 \text{ циклов.} \quad (12)$$

Обработка данных велась на основе произведения правдоподобия, которое в данном случае имеет вид:

$$L(\alpha_i, \sigma_i) = \prod_{i=1}^K f(\tau_i) \cdot (1 - F(10^6))^{N-K} \quad (13)$$

где

$f(\tau_i)$  - плотность логарифмически-нормального распределения

$$f(\tau_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \cdot \frac{1}{\tau_i} \cdot e^{-\frac{(\ln \tau_i - \alpha_i)^2}{\sigma_i^2}} \quad (14)$$

Функция логарифмически-нормального распределения для данного случая, имеет вид:

$$F(10^6) = \Phi\left(\frac{\ln 10^6 - \alpha_i}{\sigma_i}\right), \quad (15)$$

где

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{u^2}{2}} du. \quad (16)$$

Здесь  $T_L$  - наработка до разрушения,

$N$  - общее число образцов,

$k$  - число разрушенных образцов.

В результате обработки данных получены оценки параметров:

$$\alpha_L = 6,039, \beta_L = 0,429$$

Легко видеть, что с учетом 3-х сигмовой нижней доверительной границы  $\alpha_L - 3\beta_L = 4,752$  на рассеивание долговечности, минимальная долговечность составляет  $10^{\alpha_L - 3\beta_L} = 10^{4,752} = 56494$  циклов, т. е. вероятность разрушения не превосходит 0,0014.

Таким образом, из испытанных образцов, минимальная суммарная долговечность до разрушения, полученная по результатам их испытаний, равна 154400 циклов, что значительно больше установленной Разработчиком базы испытаний в 60000 циклов. На основании статистической обработки результатов испытаний установлено, что база испытаний обеспечивается с вероятностью 0,9986.

Результаты испытаний клеесварных элементов, имеющих коррозионные повреждения и разрушение которых произошло по сварным точкам, близки к результатам испытаний конструктивных элементов с коррозией на участке гладкой обшивки.

Глубина коррозии определялась после разрушения элементов и не превышала 0,2 мм, хотя все эти элементы были вырезаны из панелей, забракованных из-за коррозионных повреждений.

Конструктивные элементы не подвергались ремонту, продукты коррозии не удалялись, т. е. имитировался случай пропуска коррозии при дефектации.

Все элементы имели долговечность более 60 тыс. циклов. Разрушение наблюдалось только на втором этапе испытаний. При этом средняя долговечность на втором этапе составляла 477 тыс. циклов.

Результаты статистической обработки испытаний конструктивных элементов с коррозией на участке клеесварного соединения, близки к аналогичной обработке результатов испытаний конструктивных элементов с коррозией на участке гладкой обшивки.

В процессе ремонта, при замене обшивки клеесварная конструкция заменяется на клепаную и все возникающие в дальнейшем коррозионные повреждения будут развиваться уже на клепаной конструкции.

Глубина коррозии элементов заклепочных соединений определялась также после разрушения образцов микрометрическим методом. Долговечность всех испытанных образцов превысила 60 тыс. циклов, что соответствовало I этапу нагружения. Консервативная оценка предельной величины коррозии, соответствующей долговечности 60 тыс. цик-

лов, характеризуется точкой А, которая определяется как точка пересечения линии, соответствующей  $N_T = 50$  тыс. циклов (линия 1) и линии, ограничивающей минимальные долговечности испытанных образцов (линия 2).

Результаты испытаний элементов заклепочных соединений показаны на рис. 6.

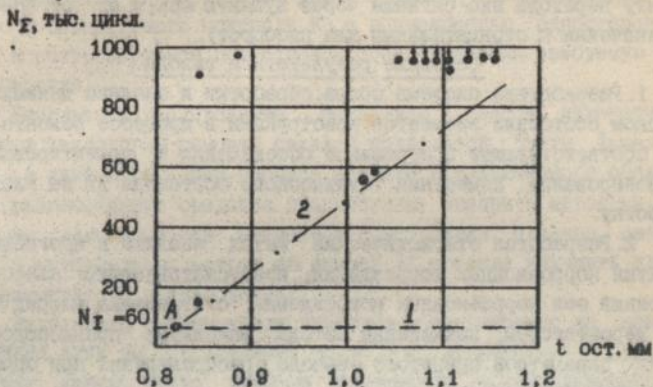


Рис. 6. Результаты испытаний конструктивных элементов с коррозией на участке заклепочного соединения

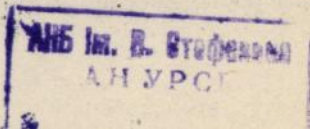
Статистическая обработка результатов испытаний заклепочных соединений, выполненная по методике аналогичной элементам гладкой обшивки, показала, что при наработке 75162 цикла вероятность разрушения не превосходит 0,0014. При этом следует отметить, что соответствующее вероятности разрушения 0,0014 количество циклов, на 25% превышает заданную базу испытаний.

Металлографические исследования позволили установить, что на обшивках панелей фюзеляжа имеет место равномерная коррозия.

Брактографические исследования образцов, разрушенных при усталостных испытаниях, позволили определить схемы строения их изломов и характер разрушения.

Данные усталостных испытаний и расчет на статическую прочность фюзеляжа, с учетом коррозионного ослабления обшивки нижних панелей показали, что полученный запас прочности позволяет увеличить ремонтные допуски до остаточной толщины листа, принятой в данном расчете за исходную величину.

В шестой главе проведен анализ существующих средств диагностики и их отличия от разработанного ультразвукового толщиноме-



ра. Разработанный при выполнении исследований ультразвуковой толщиномер отличается от существующих прототипов тем, что в нем снижена величина погрешности измерения. Это достигнуто за счет работы по "нулю" эхо-сигнала (случай, когда величина порогового напряжения равна нулю, т.е. задний фронт временного интервала формируется по моменту перехода эхо-сигнала через нулевую ось, т.е. от положительных значений к отрицательным или наоборот).

#### Основные результаты и выводы

1. Разработана система сбора, обработки и анализа данных о техническом состоянии элементов конструкции в процессе ремонта, включающая соответствующее программное обеспечение и ориентированная на прогнозирование изменения технического состояния АТ на планируемую наработку.

2. Разработан статистический метод анализа и прогнозирования развития коррозионных повреждений, предусматривающий: классификацию состояний зон коррозионных повреждений; составление матриц переходных вероятностей; применение метода максимума правдоподобия для оценки параметров принятого закона распределения при определении переходных вероятностей.

3. Обоснована оценка исчисления наработки, определяющей появление коррозии для различных элементов конструкции. Для панелей подпольной части фюзеляжа определяющей наработкой является число полетов, а для панелей центроплана - число летных часов или календарное время эксплуатации.

4. Разработано программное обеспечение для обработки и прогнозирования технического состояния АТ на основе статистической информации, получаемой в процессе ремонта, которое внедрено в практику заводов ГА.

5. Проведены усталостные испытания образцов, изготовленных из обшивок панелей подпольной части фюзеляжа, самолетов Ан-24, забракованных в процессе ремонта по причине коррозионных повреждений. Отбор образцов выполнялся в случайном порядке. Испытания показали, что остаточная долговечность образцов отвечает норме 60 000 циклов нагружения.

6. Расчет на статическую прочность нижних панелей фюзеляжа с учетом ослабления прочностных характеристик обшивок из-за коррозионных повреждений показал, что существующий запас прочности позволяет увеличить ремонтные допуски по сравнению с существующими.

7. Путем металлографического и фрактографического анализов исследуемых образцов определен вид коррозии и характер разрушения.

что позволило провести ускоренные коррозионно-усталостные испытания, имитирующие условия эксплуатации.

8. Практическая реализация комплексного метода позволила установить новые ремонтные допуски на коррозионные повреждения КЭ планера самолетов Ан-24.

9. Разработан универсальный ультразвуковой толщиномер для оперативного и объективного контроля КЭ с возможностью одностороннего доступа к контролируемой поверхности, обеспечивающий требуемую точность измерений.

10. Результаты исследований позволили внести изменения в действующую технологию ремонта панелей подпольной части фюзеляжа, внедрить в технологический процесс ремонта и технического обслуживания ВС разработанные средства диагностики; внедрить методики прогнозирования долговечности элементов конструкции планера, расхода трудовых и материальных затрат на ремонт АТ, а также улучшить планирование ритмичности производства.

Результаты работы, нашли практическое внедрение на заводах ГА, ГосНИИГА, АНТК им. О. К. Антонова, кроме того, разработанные средства диагностики нашли также широкое применение в эксплуатационных предприятиях ГА.

Экономический эффект от внедрения результатов настоящей работы на 3-х заводах ГА составляет 7,8 млн. руб. в год.

В приложениях приведены данные об испытанных образцах, результаты усталостных испытаний и расчетов на статическую прочность, результаты обработки статистических данных, результаты фрактографии и акты внедрения.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Коррозионные повреждения планера самолета и трудовые затраты при его ремонте. - В кн.: Эксплуатационная надежность планера и систем воздушных судов. - Киев: КИИГА, 1981. С. 70-72 /соавтор Лебедев Ю. А. /

2. Исследование влияния коррозионных повреждений на усталостную долговечность конструктивных элементов центроплана ближнего магистрального самолета. - В кн.: Оценка технического состояния и диагностирование планера и систем воздушных судов гражданской авиации. - Киев: КИИГА, 1984. С. 23-26 /соавторы Чугунов, Н. В., Лебедев Ю. А., Барушкевич М. В. /

3. Анализ коррозионных повреждений силовых элементов планера самолета Ан-24. - В сб.: Инженерно-авиационное обеспечение безопасности полетов. Тез. докл. - М.: МИИГА, 1985. С. 48

4. Исследование моделей иочерпание и восстановления работоспособности панелей подпольной части фюзеляжа самолетов местных воздушных линий, поврежденных коррозией. - В кн.: Динамика технического состояния конструкции воздушных судов гражданской авиации в процессе эксплуатации и ремонта. - Киев: КИИГА, 1987. С. 27-30. / Соавтор Лебедев Ю. А. /

5. Социальные аспекты развития инженерного труда на заводах гражданской авиации. - В сб.: Социальные проблемы труда в народном хозяйстве. Тез. докл. Респ. науч. - практ. конференции "Социальные проблемы труда". - Киев: СОПС АН УССР, 1989. С. 153.

6. Новые формы сбора информации о коррозионных поражениях при ремонте воздушных судов. - В кн. Приоритетные направления развития технологии ремонта и надежности авиационной техники. - Киев: КИИГА, 1991. С. 22-24 /Соавтор Лебедев Ю. А. /.

7. Использование вероятностных моделей при анализе развития коррозионных повреждений планера воздушных судов. Киев: Деп. в Укр. ИНТЭИ. Рег. N 1228, 1992.

8. Долговечность элементов обшивки фюзеляжа самолетов Ан-24, имеющих коррозионные повреждения. - Киев: Деп. в УкрИНТЭИ. Рег. N 1229, 1992.

9. Средства диагностики и контроля элементов конструкции, имеющих коррозионные повреждения. - Киев: Деп. в Укр. ИНТЭИ. Рег. N 1230, 1992, /Соавтор Коваль А. С. /.

10. Вероятностно-статистические методы оценивания долговечности элементов конструкции планера самолета при наличии коррозионных повреждений. - Киев: Деп. в Укр. ИНТЭИ. Рег. N 1231, 1992, /Соавтор Макаров В. А. /.

---

Подписано в печать 29.09.92. Формат 60x84/16. Бумага типографская. Офсетная печать. Усл. печ. л. I, 16. Уч. - изд. л. I, 25. Тираж 100 экз. Заказ № I70-I. Цена Изд. №348/Ш

---

Издательство КИИГА.

252058. Киев-58, проспект Космонавта Комарова, I







AB 25.917