



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и
наземного оборудования»

Учебно-методическое пособие по дисциплине

«Техническая диагностика летательных аппаратов»

Авторы
Годунова Л. Н.

Ростов-на-Дону, 2019

Аннотация

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов очной формы обучения направления 24.03.04 «Авиастроение».

Авторы

к.т.н., доцент кафедры «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и наземного оборудования»
Годунова Л.Н.



Оглавление

Введение	4
Практическое занятие №1.....	6
Диагностирование по изменению рабочих параметров. Диагностирование по изменению физико-механических параметров.....	6
Практическое занятие №2.....	19
Вибродиагностика. Цифровые методы обработки диагностических сигналов, понятие о спектрах.....	19
Практическое занятие №3.....	27
Принципы построения методов неразрушающего контроля (НК) на основе использования волновых процессов. Классификация видов НК.....	27
Практическое занятие №4.....	50
Ультразвуковая дефектоскопия (УЗД). Вихретоковый метод НК.	50
Практическое занятие №5.....	73
Магнитные методы НК. Визуально-оптический и капиллярный методы НК.	73
Практическое занятие №6.....	83
Характеристика систем регистрации параметров и алгоритмов обработки полетной и наземной информации. Типовая структура и задачи лаборатории диагностики на авиапредприятии.....	83
Практическое занятие №7.....	107
Закономерности изменения технического состояния газотурбинных двигателей.	107
Список литературы.....	144

ВВЕДЕНИЕ

Целями освоения дисциплины «Техническая диагностика летательных аппаратов» являются:

- формирование теоретических знаний о методах и средствах технической диагностики (ТД) и неразрушающего контроля (НК);
- освоение студентами общих вопросов применения диагностической аппаратуры при поиске неисправностей авиационной техники;

Для достижения поставленных целей в рамках дисциплины решаются задачи подготовки студентов к решению вопросов контроля технического состояния и повышения качества эксплуатации и ремонта авиационной техники.

Дисциплина «Техническая диагностика летательных аппаратов» является одной из дисциплин вариативной части «Профессионального цикла» (Б1.В. 07).

Дисциплина базируется на дисциплинах математического и Общепрофессионального цикла: «Математика», «Физика», «Химия», «Сопротивление материалов», «Материаловедение и технология конструкционных материалов».

В результате изучения дисциплины обучающийся должен знать:

- перспективные планы и направления развития современных летательных аппаратов и авиационных двигателей;
- технологии и формы организации диагностики летательных аппаратов и авиационных двигателей.

уметь:

- исследовать и анализировать причины отказов и неисправностей авиационных двигателей;
- исследовать причины потери прочности деталей авиационных двигателей при статических и динамических нагрузках;
- анализировать причины отказов и неисправностей воздушных судов;
- организовывать и обеспечивать контроль технического состояния воздушных судов;

организовывать и обеспечивать оперативный учет отказов и неисправностей воздушных судов;

владеть:

- измерения диагностических параметров;
- анализом состояния летательных аппаратов и авиационных двигателей по полученным параметрам и по косвенным признакам;
- методами контроля технического состояния воздушных судов;

В процессе изучения дисциплины каждому студенту рекомендуется вести конспект изучаемой по данной дисциплине литературы.

Кроме самостоятельного изучения материала для студентов читаются в университете обзорные лекции, по основным вопросам курса проводятся практические занятия.

В процессе самостоятельного изучения дисциплины студенты выполняют курсовую работу.

Материал должен изучаться последовательно согласно данным методическим указаниям. Качество изучения проверяется умением правильно и полно отвечать на вопросы самоподготовки, представленные в конце методических указаний. Ответы рекомендуется записывать в конспект по изучению данной дисциплины, который предъявляется при сдаче экзамена.

Студенты могут получать от преподавателей письменную или устную консультацию по интересующим его вопросам данного курса.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1.**Диагностирование по изменению рабочих параметров. Диагностирование по изменению физико-механических параметров.***Диагностирование по изменению рабочих параметров ГТД*

Диагностирование ГТД по газодинамическим параметрам является одним из эффективных методов оценки его технического состояния. Этим методом выявляется главный параметр – способность ГТД обеспечивать требуемую мощность или тягу.

Как известно, технические условия на эксплуатацию ограничивают значения параметров, характеризующих процесс реализации алгоритма функционирования. Поэтому, зная величину функционального параметра и его ограничения, можно судить об исправности, работоспособности и правильности функционирования объекта.

Данный метод оценки состояния ГТД основывается на анализе тенденций изменения отклонения нерегистрируемых параметров от эталонных (базовых) значений. В свою очередь нерегистрируемые параметры рассчитываются по результатам измерения регистрируемых (контролируемых) параметров [4,5].

В качестве диагностических регистрируемых параметров ГТД используют температуру газов за турбиной T^* , частоту вращения роторов высокого $n_{вд}$ и низкого $n_{нд}$ давления, часовой расход топлива G_T , давление топлива перед форсунками p и температуру масла на входе в двигатель t_n . Кроме того, на входе в двигатель регистрируются полная температура и полное давление наружного воздуха.

На рис. 2.1 показана последовательность обработки регистрируемых параметров.

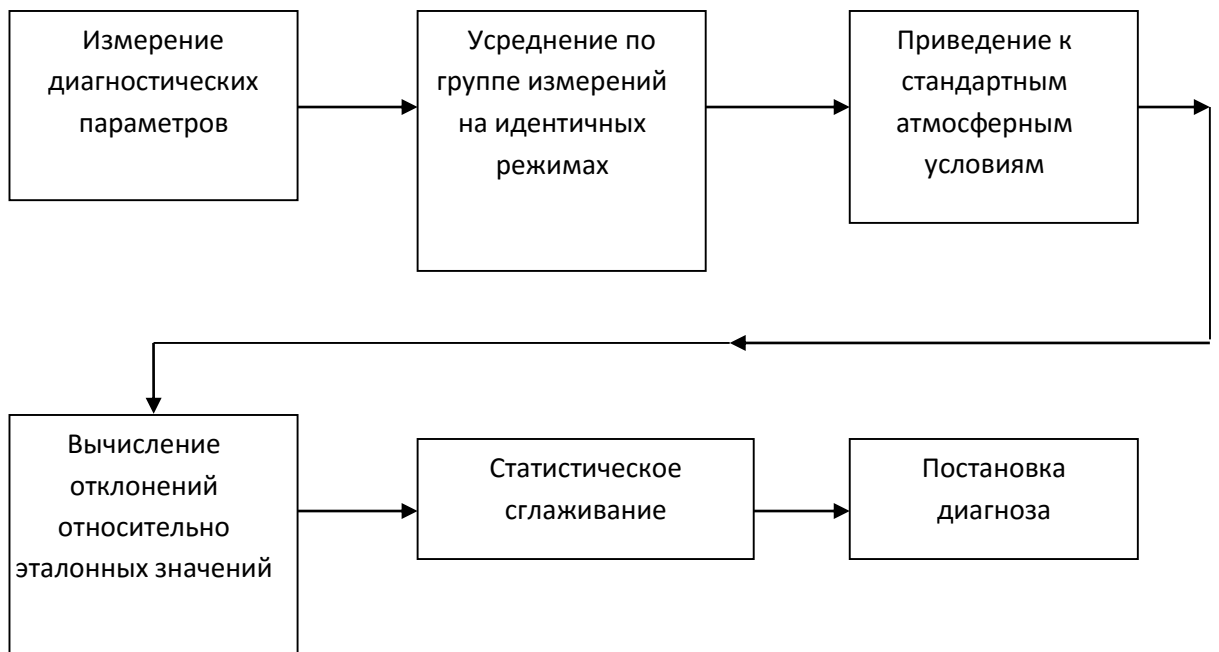


Рис.2.1. Последовательность обработки регистрируемых параметров

Нерегистрируемые параметры ГТД – это параметры проточной части (камер сгорания, форсунок, состояние лопаток компрессора и турбины, коэффициент полезного действия и тяга двигателя и т.д.).

Данный метод позволяет выявить только те неисправности, которые вызывают изменение отклонений термогазодинамических параметров и параметров системы смазки. Характерные выявляемые неисправности – это увеличение радиальных зазоров в лопаточных машинах, износ торцов лопаток компрессора, турбины, коробление лопаток компрессора, турбины и газоздушного тракта, изменение формы профилей лопаток компрессора и турбины, прогар, коробление камер сгорания и лопаток соплового аппарата, разрушение лабиринтных уплотнений и т.п.

Для определения отклонений нерегистрируемых параметров используется система линейных уравнений, где в качестве независимых величин приняты отклонения регистрируемых параметров. Применение линейных уравнений при решении диагностических задач возможно, так как при проявлении неисправностей в начальной стадии их развития параметры двигателя

изменяются в пределах, удовлетворяющих линеаризованным термогазодинамическим уравнениям:

$$\begin{pmatrix} \delta y_1 \\ \delta y_2 \\ \dots \\ \delta y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta x_1 & \delta x_2 & \dots & \delta x_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix},$$

где δy_n – нерегистрируемые термогазодинамические параметры (КПД турбины и компрессора, температура заторможенного потока, удельный расход топлива, тяга двигателя и т.п.); δx_n – регистрируемые в эксплуатации параметры; a_{mn} – коэффициенты влияния.

Последовательность определения состояния двигателя по нерегистрируемым параметрам в этом случае следующая:

- составляются системы уравнений для неисправностей, выявление которых предусматривается в эксплуатационной документации на данном типе двигателей;
- регистрируются отклонения параметров δx_n на выбранном режиме полета и работы двигателя;
- строится график изменения δy_n по наработке и производится анализ тенденций изменения этих параметров по результатам решения системы уравнений. Критериями оценки изменения состояния двигателя служат скорость изменения и абсолютные значения δy_n .

В тех случаях, когда измерение термодинамических параметров проводится на режимах, отличных от стандартных, вводят поправки, учитывающие эти отклонения. Если в процессе эксплуатации проводились регулировки, влияющие на уровень термогазодинамических параметров, то при анализе тенденций отклонений параметров учитываются эти регулировки.

В качестве характеристик исправного состояния двигателя принимаются эталонные (базовые) кривые определенного двигателя, полученные при контрольно-сдаточных испытаниях, или индивидуальные эталонные кривые для каждого двигателя.

Для примера рассмотрим расчет нерегистрируемого параметра –тяги двигателя, по результатам регистрируемых в полете параметров с использованием следующей зависимости [8]:

$$R = A_0 + A_1 N_{НД} + A_2 N_{НД}^2 - K_{СКВ} G_{СКВ},$$

где A_0 , A_1 , A_2 – коэффициенты, определяемые по формулярным данным двигателя; $N_{НД}$ – приведенная частота вращения ротора низкого давления; $K_{СКВ}$ – постоянный коэффициент; $G_{СКВ}$ – расход воздуха на систему кондиционирования.

Приведение частоты вращения ротора низкого давления к стандартным атмосферным условиям выполняется по формуле:

$$N_{НД} = N_{НДизм} \sqrt{288/T} n_{\alpha},$$

где $N_{НДизм}$ – измеренное значение частоты вращения ротора низкого давления; T – абсолютная температура наружного воздуха; n_{α} – коэффициент, учитывающий влажность воздуха.

Аналогичным способом приводятся к стандартным атмосферным условиям и другие регистрируемые параметры работы двигателя (температура газов за турбиной, удельный расход топлива).

Для выявления возможных неисправностей в двигателе, возникающих в процессе его функционирования, измеренные величины и величины, рассчитанные по результатам измерения параметров работы, проходят статистическую обработку. Обработка выполняется при условии прохождения параметрами допускового контроля.

Методика выявления неисправностей основана на сопоставлении текущих значений параметров со статистическими характеристиками параметров работы данного двигателя и статистическими характеристиками совокупности случайных процессов изменения параметров работы парка исправных двигателей.

Для каждого двигателя по каждому параметру определяются диапазоны статистически возможных и статистически допустимых изменений параметров.

Диапазон статистически возможного изменения каждого параметра с заданной доверительной вероятностью характеризует прогнозируемую область разброса параметра данного двигателя относительно его среднего значения в зависимости от числа измерений в процессе контроля.

Диапазон статистически допустимых изменений любого из параметров характеризует с заданной доверительной вероятностью область допустимого разброса параметра двигателя относительно его среднего значения и определяется на основании данных о разбросе величины анализируемого параметра по парку исправных двигателей.

Исправному состоянию двигателя соответствует нахождение измеренных значений параметров внутри диапазона статистически возможного изменения параметра, а диапазон статистически возможного изменения находится внутри статистически допустимого диапазона.

Возможному началу развития неисправности двигателя или измерительной аппаратуры, предназначенной для измерения и обработки параметра, соответствует выход величины измеренного параметра за пределы статистически возможного диапазона.

Для проверки факта начала развития неисправности начинается отсчет числа всех последующих замеров параметра. Если в процессе выполнения данного числа замеров выход параметра за статистически возможный диапазон повторяется трижды, то диагностическая система предписывает выполнение работ по выявлению неисправности на ранней стадии ее развития.

Если принятые меры не оказались эффективны и продолжают случаи выхода параметра за установленные пределы, то система выдает информацию о выходе параметра за допустимый диапазон K раз за A полетов.

Если измеряемый параметр выходит за верхнюю границу статистически возможного уровня, то повышается вероятность неисправности элементов газодинамического тракта двигателя.

Необходимо иметь в виду, что границы статистически возможного диапазона изменения каждого анализируемого параметра определяются для номера замера, большего 20, так как в предыдущие полеты накапливаются исходные данные для расчетов. При этом доверительная вероятность оценки среднего значения параметра соответствует значению 0.995, доверительная вероятность оценки дисперсии соответствует значению 0.95, уровень значимости соответствует 0.005.

Диагностирование по изменению физико-механических параметров ГТД.

Оценка технического состояния деталей, омываемых маслом, осуществляется по наличию металлических частиц – продуктов износа деталей кинематических пар, которые улавливаются с использованием штатных чувствительных элементов – датчиков и сигнализаторов. Количество продуктов изнашивания зависит от скорости развития дефектов и является диагностическим признаком технического состояния деталей. Это направление работ носит название «трибодиагностика».

С помощью трибодиагностики выявляются неисправности подшипников и лабиринтных уплотнений опор роторов, деталей коробки приводов и центрального привода, приводных агрегатов, включенных в маслосистему ГТД (электрогенераторы, гидронасосы).

Обычно износ деталей начинается с выкрашивания поверхностного слоя под воздействием динамических нагрузок. Первопричина этого процесса

заключается в незначительных отклонениях в механических свойствах и структуре материала деталей, а также в их размерах. В местах контакта образуются язвочки, что способствует росту концентрации напряжений и дальнейшему разрушению материала.

В процессе развития неисправностей поток масла в системе смазки уносит оторванные частицы от мест разрушения. Масло в этом случае выступает как носитель информации о появлении неисправностей.

Необходимо уметь отличать продукты нормального износа, имеющие место в процессе всего периода эксплуатации ГТД, от металлических частиц, появляющихся при разрушениях или выявленных при осмотре и ремонте.

Нормальная кривая закона изменения содержания металла в масле приведена на рис. 2.2. Можно выделить три участка в процессе образования частиц износа за период эксплуатации:

- 1 участок – приработка (длится порядка 100 часов). В этот период осадок в масле из мелких частиц может то увеличиваться, то снижаться;
- 2 участок – период нормальной эксплуатации ГТД. На этом этапе мелкие частицы износа (размером не более 0.5 мкм) образуют пастообразную массу с низкой вязкостью и обычно не оказывают вредного действия на работу двигателя;
- 3 участок – износ нарастает, дефекты прогрессируют, размер частиц сильно увеличивается (до 60 мкм).

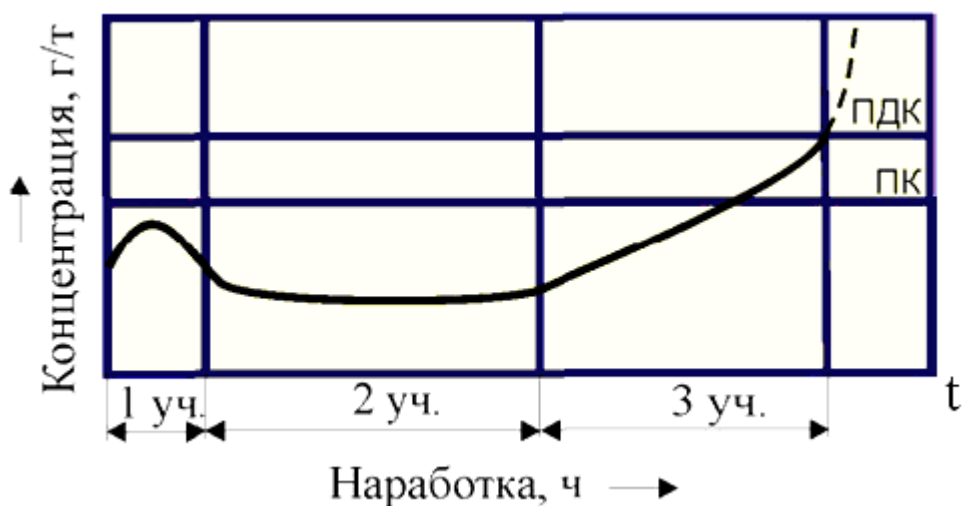


Рис. 2.2. Характер изменения концентрации частиц износа в масле при эксплуатации:

ПК – повышенная концентрация частиц в масле, при которой двигатель допускается эксплуатировать под «особым контролем»; ПДК – предельно допустимая концентрация, при достижении которой двигатель подлежит отстранению от эксплуатации

Контроль содержания в масле частиц износа условно можно подразделить на бортовой и лабораторный (наземный). Бортовой контроль необходим для предупреждения о дефекте узлов трения во время работы ГТД (в полете) за небольшой интервал времени до возникновения опасности их разрушения.

К бортовым средствам обнаружения частиц износа относятся:

- электрические детекторы; при накоплении определенного количества продуктов износа происходит замыкание контактов и формирование предупреждающего сигнала на приборную панель экипажу или записывающее устройство;
- магнитные пробки (МП), которые устанавливаются в трубопроводах и полостях двигателя в районах циркуляции масла. Осмотр МП выполняется в процессе ТО на земле с периодичностью, предусмотренной регламентом.

Лабораторный контроль выполняется в наземных условиях путем спектрального анализа проб масла, феррографического и гранулометрического анализов, а также определения марки материала продуктов износа. В процессе спектрального анализа определяются концентрации в масле металлов, из которых состоят частицы износа. Как правило, определяется содержание железа и меди, реже серебра. Феррографический анализ позволяет выявлять размеры, форму и количество крупных частиц в масле. По этим параметрам можно составить картину характера повреждения трущихся поверхностей.

При гранулометрическом анализе оценивается общая загрязненность масла любыми частицами с определением их размеров, количества и соответствия нормируемому классу чистоты масла по ГОСТу 17216-2001.

Периодичность отбора проб масла устанавливается не реже, чем через 200 часов полета. Пробы масла берутся через 15...40 минут после остановки двигателя, пока частицы износа находятся во взвешенном состоянии. При возрастании содержания продуктов износа в масле отбор проб производится чаще.

Для определения концентрации продуктов износа в масле на авиапредприятиях преимущественно используются установки двух типов:

- МФС-5 (МФС-7) – многоканальный фотоэлектрический спектрометр, основанный на применении эмиссионного спектрального метода;
- БАРС-3 – бездифракционный анализатор рентгеновский скоростной, основанный на реализации рентгеноспектрального метода определения содержания продуктов износа в работавших маслах.

Рассмотрим схему работы МФС. Он предназначен для возбуждения эмиссионных спектров и регистрации сигналов, вызванных излучением спектральных линий различных элементов, находящихся в работавшем масле. На рис. 2.3 показана принципиальная схема МФС-7.

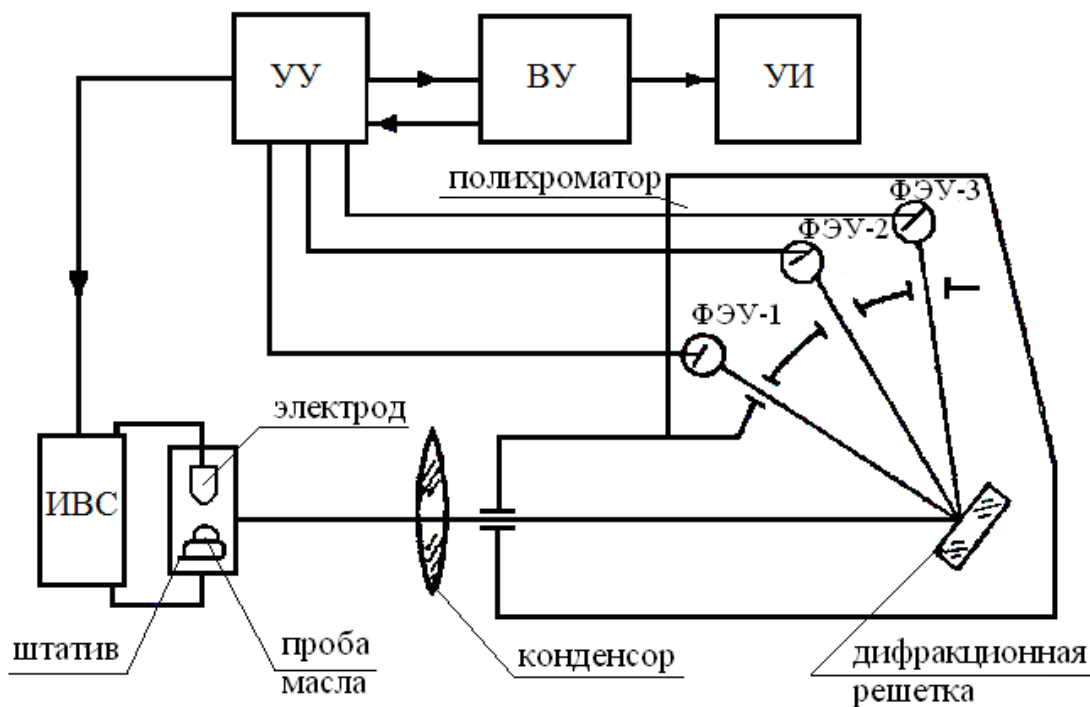


Рис.2.3. Схема МФС-7

При спектральном анализе пробы масла сжигают в электрической дуге. В основу работы установки положен метод эмиссионного спектрального анализа, использующий явление свечения газа или пара исследуемого вещества в результате нагревания его до температуры выше 1000°C . Свечение через усилительную линзу поступает в полихроматор, где установлена дифракционная решетка, разлагающая спектр излучения на составляющие по длинам волн. Излучение с определенными длинами волн фокусируется в виде спектра на сферической поверхности полихроматора. В сфере имеются девятнадцать узких щелей, через которые излучение с определенными длинами волн попадает на катоды фотоэлектронных умножителей (ФЭУ).

Электрический сигнал с каждого ФЭУ соответствует определенной длине волны или части спектра и пропорционален интенсивности свечения, а следовательно, концентрации продуктов износа. Управляющее устройство (УУ) управляет работой установки и обработкой сигналов. Вычислительное устройство (ВУ) обрабатывает полученную информацию и передает на устройство индикации (УИ). В составе УИ имеются цифропечатающее устройство и цифровой вольтметр.

Установки типа МФС позволяют с высокой точностью определять концентрацию 10 элементов (железо, медь, серебро, алюминий, свинец, кремний, магний, хром, никель, олово). Время обжига масла составляет 20...25 с. Продолжительность анализа одной пробы масла составляет 3 мин.

Установки типа МФС требуют периодического проведения тарировок для проверки зависимости величины регистрируемых сигналов от концентрации химических элементов в масле.

В настоящее время все большее распространение на авиационных предприятиях получает более точный, надежный, простой в использовании прибор БАРС-3. Действие анализатора заключается в возбуждении и регистрации флуоресцентного излучения химических элементов, входящих в

состав анализируемого вещества. Анализатор БАРС-3 дает возможность проводить экспресс-анализ масла на содержание элементов железа, меди, хрома, никеля, цинка, свинца, молибдена, кобальта, титана, марганца и др.

Практика эксплуатации авиационных ГТД показывает, что в тех случаях, когда использование дорогостоящих приборов типа МФС и БАРС не представляется возможным, с успехом может применяться сравнительно дешевый анализатор ПОЖ-М (прибор определения железа в работающих маслах).

Принцип работы прибора основан на измерении силы взаимодействия отфильтрованных частиц железа с постоянным магнитом, укрепленным на коромысле крутильных весов. Количество железа в анализируемом масле определяется по углу закрутки крутильных весов. Шкала прибора оттарирована в граммах железа на тонну масла.

При использовании описанных приборов пробы масла отбираются из двигателя с определенной периодичностью по наработке, а в ряде случаев после каждого прилета ВС в базовый аэропорт.

Все результаты анализа масла заносятся в специальные карты, в которых указываются величины концентрации металлов и скорости ее нарастания. Если концентрация элементов износа достигает заданного уровня, то периодичность отбора проб масла из двигателя сокращается.

При достижении концентрации одного из элементов износа предельного уровня дальнейшая эксплуатация двигателя приостанавливается до выяснения причин и источника поступления продуктов износа в масло. По химическому составу продуктов износа возможно установить те группы деталей двигателя, неисправность которых может служить причиной повышения концентрации металла в масле:

- Fe – тела качения, обоймы и сепараторы подшипников, шестерни, рессоры и детали уплотнений;

- Cu – подпятники, маслоуплотнительные кольца, бронзовые и латунные сепараторы подшипников, омедненные шлицы рессор;
- Al, Mg – корпуса и детали агрегатов маслосистемы и системы суфлирования, корпуса коробок приводов и их крышки.

Исследуя комбинации элементов продуктов износа в зависимости от наработки, возможно устанавливать неисправные узлы и в определенной степени прогнозировать техническое состояние двигателя.

Основные неисправности, выявляемые параметрической диагностикой маслосистемы:

- неисправности системы измерения параметров маслосистемы (датчиков, сигнализаторов, разъемов, линий связи);
- засорение, неисправность маслофильтров;
- негерметичность масляных уплотнений и трубопроводов;
- неисправность маслоагрегатов (маслонасосов, маслобака, воздухоотделителей, теплообменников).

Действующий стандарт устанавливает минимальный перечень измеряемых параметров маслосистемы ГТД для самолетов:

- давление масла на входе в двигатель;
- температура масла на входе в двигатель;
- количество масла в баке;
- максимальный перепад давления на масляном фильтре;
- стружка в масле.

Диагностирование параметров маслосистемы осуществляется бортовыми и наземными средствами контроля по измеренным и приведенным к стандартным атмосферным условиям и режиму параметрам.

Во время полета ВС применяется оперативный контроль, который предназначен для выявления быстроразвивающихся неисправностей и принятия решений о дальнейших действиях экипажем во время полета.



Оперативный контроль осуществляется в процессе работы ГТД средствами бортовой системы контроля и визуально экипажем по отображаемым в кабине самолета параметрам. При этом измеренные значения сравниваются с предельно допустимыми значениями, и при выходе за допуск система контроля ГТД выдает сигнал в информационную систему самолета.

Выявление неисправностей ГТД на ранней стадии их развития осуществляют наземные комплексы диагностирования, которые отслеживают изменение параметров каждого ГТД в отдельности в течение полета и за весь период эксплуатации.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2.

Вибродиагностика. Цифровые методы обработки диагностических сигналов, понятие о спектрах.

Вибрационный метод контроля

Вибрационный метод контроля состояния и работоспособности контролируемого объекта, основан на регистрации вибраций. Для исследования технического состояния элементов конструкции ВС вибрационным методом используют штатную аппаратуру измерения уровня вибрации двигателей. При усилении вибрации двигателя вначале проверяют правильность показаний штатной аппаратуры с использованием специальной аппаратуры (VM-3X), а также проводят дополнительные измерения.

Характерные дефекты, выявляемые этим методом с использованием штатной аппаратуры – это дисбаланс роторов двигателя в результате износа элементов конструкции и обрыва лопаток, нарушение газодинамических процессов, появление трещин и усталостных разрушений силовых элементов и, чаще, потеря жесткости амортизаторов крепления двигателей.

Износ, неисправности и трещины межвального подшипника двигателя Д-30КУ-154 фиксируется аппаратурой ИВУ-1М.

Принцип действия ИВУ-1М основан на сравнении показаний микроамперметра, встроенного в электронный блок, с нормированными значениями, соответствующими исправному состоянию. Показания прибора зависят от интенсивности колебаний, воспринимаемых вибродатчиком, закрепленным на штанге, помещенной внутрь вала турбины низкого давления определенным образом. Вибродатчик во время ручной прокрутки наружного вала прижимают к внутренней поверхности неподвижного внутреннего вала в месте расположения подшипника с помощью пружины с тросовым управлением и снимают показания с микроамперметра, прослушивая шумы от исследуемого подшипника через головные телефоны.

Методы и средства диагностирования по виброакустическим параметрам

Измерение вибрации осуществляется с использованием вибропреобразователей (ВП). В них механические колебания преобразуются в электрический сигнал. Применяются ВП пьезоэлектрического, индукционного и вихретокового типа.

На рис.3.1. представлена схема ВП пьезоэлектрического типа и его частотная характеристика.

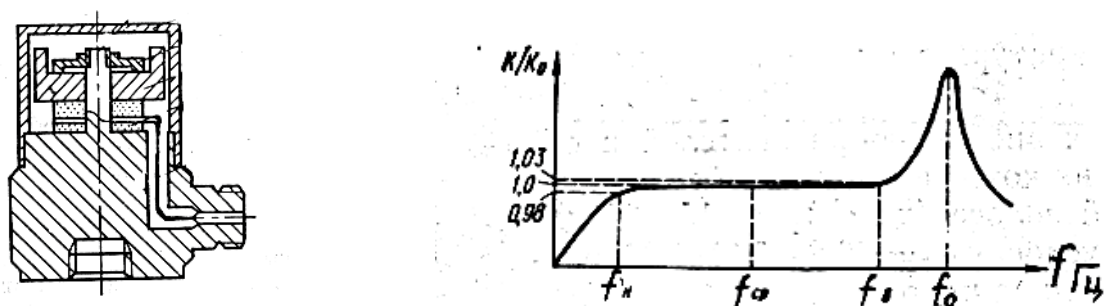


Рис.3.1 Вибропреобразователь и его частотная характеристика

Основной элемент такого ВП – кварцевый кристалл, который под действием сейсмической массы, прижатой пружиной к кристаллу, преобразует виброускорение массы в пропорциональное электрическое напряжение. Чувствительность ВП по заряду выражается в пКл/g, где g -ускорение свободного падения. Диапазон измерений располагается в линейной области частотной характеристики датчика. ВП используется с предусилителем, который помимо усиления сигнала выполняет роль согласующего устройства высокоомного выхода ВП с низкоомным входом измерительной аппаратуры.

Типовая схема серийного бортового и стендового измерительного тракта, обеспечивающая контроль параметров вибрации ГТД на роторных частотах, представлена на рис.3.2.

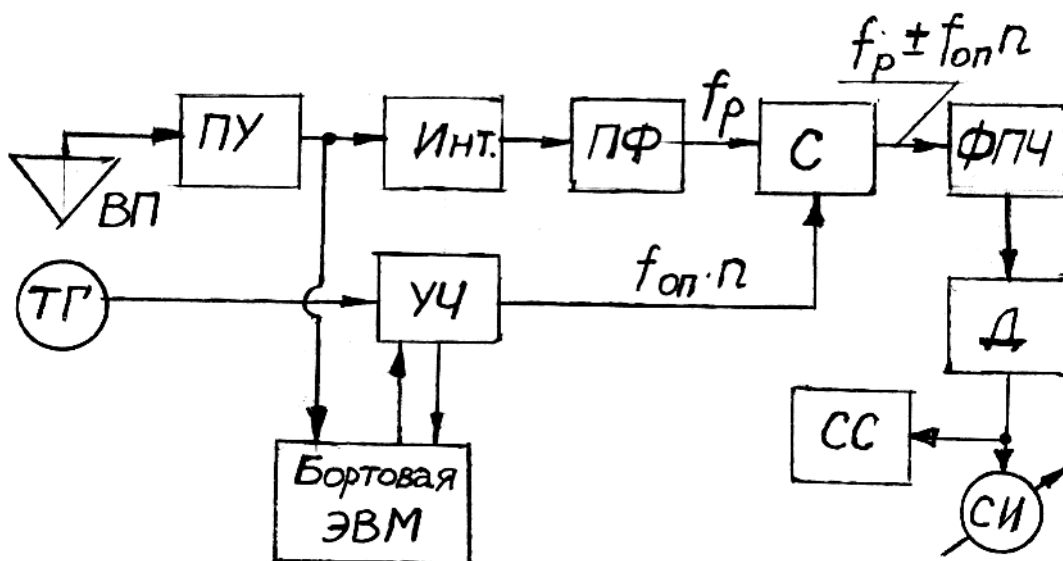


Рис.3.2 Схема виброизмерительного тракта:

ВП - вибропреобразователь (пьезоакселерометр); ПУ-предусилитель с согласующим устройством; Инт – интегратор; ПФ - полосовой фильтр; ТГ – тахогенератор; УЧ - умножитель частоты; С – смеситель; ФПЧ - фильтр промежуточной частоты; Д – детектор; СИ - стрелочный индикатор; СС - блок световой сигнализации.

Сигнал от ВП и ПУ через интегратор (Инт) поступает на вход полосового фильтра ПФ, где сигнал с частотой f_p предварительно фильтруется. Опорная частота $f_{оп}$ для настройки ФПЧ поступает с тахогенератора ТГ через умножитель частоты УЧ с коэффициентом умножения n . Сигналы с частотами f_p и $f_{оп}n$ поступают на смеситель С.

Фильтр ФПЧ настроен на промежуточную частоту $f_{пч} = f_p - f_{оп}n$, амплитуда которой пропорциональна амплитуде виброускорения на частоте полезного сигнала f_p . Далее сигнал детектируется и подается на стрелочный индикатор СИ для измерения, а также на блок световой сигнализации СС, который снабжен регулируемым пороговым устройством, срабатывающем при превышении допустимого уровня виброскорости. Некоторые системы имеют выход широкополосного сигнала по напряжению для регистрации на магнитографе.

На современных авиалайнерах, оборудованных бортовым компьютером, применяется система, сочетающая аналоговую и цифровую обработку как параметров рабочих процессов, так и виброакустических сигналов. Соответствующее программное обеспечение позволяет автоматически сравнивать уровни вибрации в заданных спектральных полосах с уровнями опасности (тревоги) нормального состояния; отображать тренды и спектры сигналов как на установившихся режимах работы, так и на переходных процессах. Примером является система VM-600 швейцарской фирмы “vibro-meter”, применяемая на самолетах фирмы “Boing.”

Для наземного и стендового контроля вибрации ГТД и других агрегатов и механизмов применяются универсальные портативные микропроцессорные анализаторы «Кварц» фирмы «Диамех», ПР-200Ех НТЦ ПРИЗ, МС-300D НПП «МЕРА».

Представление диагностических сигналов в цифровом виде

Как правило, первичными при диагностике машин и механизмов являются непрерывные (аналоговые) сигналы. Они могут быть разной физической природы, но обычно преобразуются в электрическое напряжение или ток. Будем, для простоты, рассматривать изменение амплитуды сигнала во времени $U = U(t)$, выраженное в вольтах. Для цифровой обработки таких сигналов на ЭВМ используются аналого-цифровые преобразователи. Их основные функции: дискретизация во времени, квантование по уровню амплитуд и получение кодов чисел (оцифровка).

Дискретизация по времени означает, что сигнал представляется рядом своих отсчетов, взятых через равные промежутки времени. Например, когда мы говорим, что частота дискретизации F равна 20 кГц, то это значит, что сигнал измеряется 20000 в течение секунды. Значения отсчетов равны значениям непрерывного сигнала в эти моменты времени $U_n = U(n\Delta t)$. Число Δt называется

интервалом (шагом) дискретизации, а число $f_d = 1/\Delta t$ - частотой дискретизации исходного сигнала. Если исследуется сигнал на промежутке времени $[0, T]$, то последовательность содержит $N = T/\Delta t$ отсчетов.

Ясно, что точность воспроизведения аналогового сигнала по последовательности его отсчетов зависит от величины интервала дискретизации. Чем он меньше, тем точнее воспроизводит последовательность отсчетов исходный непрерывный сигнал. С другой стороны, уменьшение Δt приводит к увеличению объема подлежащей обработке информации.

Оптимальный выбор интервала дискретизации устанавливается теоремой Котельникова. Она утверждает, что произвольный сигнал $u(t)$, спектр которого ограничен частотой F_u , может быть однозначно восстановлен по последовательности своих отсчетных значений, следующих с интервалом времени

$$\Delta t = 1/(2F_u).$$

Обычно частота дискретизации берется несколько больше чем в два раза по сравнению с верхней анализируемой полосой частот. Интервал дискретизации Δt и частоту F_u называют соответственно интервалом и частотой Найквиста.

При заданной частоте дискретизации f_d гармоники с частотой, превышающей частоту Найквиста $f_N = f_d/2$, будут интерпретироваться после дискретизации, как другие гармоники с частотой, меньшей частоты Найквиста. Это явление называется наложением частот и для борьбы с ним до АЦП устанавливается аналоговый фильтр нижних частот, подавляющих все частоты выше частоты Найквиста.

Длина выборки связана еще с минимальной анализируемой частотой. Например, если оборотная частота вала равна 0,5 Гц; то необходимо оцифровывать сигнал по крайней мере 2 секунды.

Для представления аналогового сигнала в виде дискретных отсчетов его предварительно квантуют по уровню напряжения. При этом весь диапазон возможных изменений амплитуд от 0 до U_{\max} (или от $-U_{\max}$ до U_{\max}) делится на

определенное число равных частей. Величина каждой части ΔU называется шагом квантования. При оцифровке эти фиксированные уровни кодируются последовательными целыми числами в двоичной форме. Поэтому, если АЦП содержит k двоичных разрядов, то число уровней квантования будет равно 2^k . Например, для трехразрядного АЦП число уровней квантования равно 8, а для 12-разрядного – $2^{12} = 4096$.

Значения сигнала в точках дискретизации по времени округляются до ближайшего значения уровня квантования. При этом возникают ошибки округления, которые приводят к погрешностям, называемым шумом квантования. Шум квантования можно рассматривать как случайную величину, равномерно распределенную в интервале $[-\Delta U/2, \Delta U/2]$. Поэтому он вносит большую относительную погрешность при преобразовании амплитуд близких к нижним уровням квантования. Стремление снизить шум квантования до уровня, обеспечивающего необходимую точность воспроизведения непрерывного сигнала, определяет требование к необходимому количеству разрядов АЦП, а также предварительному усилению сигнала.

Анализ спектра сигнала

В целом ряде задач вибродиагностики желательно иметь полное представление о колебательном процессе, то есть его спектр. Спектральный анализ исследует периодические модели вибрации. Цель анализа – разложить сложное колебание с циклическими компонентами, смешанными с широкополосным шумом, на несколько гармоник с определенными частотами, на которых сосредоточен максимум энергии колебаний.

При цифровой обработке сигналов анализируются дискретные спектры, содержащие конечное число гармонических составляющих. Обычно для спектрального анализа используется дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Рассмотрим числовую последовательность x_n ($n = 0, 1, \dots, N-1$). Дискретным

преобразованием Фурье этой последовательности называется последовательность y_n ($n = 0, 1, \dots, N-1$), определяемая формулой:

$$y_k = 1/N \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp(-i2\pi kn/N),$$

где $n, k = 0, 1, \dots, N-1$.

Основные свойства этого преобразования:

а) ДПФ линейно, т.е. сумма последовательностей переходит в сумму их ДПФ, а постоянный общий множитель членов последовательности можно вынести за знак преобразования.

б) Пусть промежуток дискретизации последовательности x_n равен Δt , частота дискретизации $f_d = 1/\Delta t$, время прохождения дискретизированного сигнала $T = N\Delta t$. Тогда дискретизированный гармонический сигнал, содержащий целое число периодов k на промежутке анализа, будет иметь в спектре одну ненулевую составляющую, стоящую на k -ом месте.

Таким образом, здесь имеется аналогия с рядом Фурье для периодической функции и результат ДПФ можно рассматривать как дискретный спектр разложения исходного сигнала по гармоническим составляющим с частотами, кратными минимальной частоте. f_d/N . Эта частота называется разрешением спектра при использовании ДПФ. Например, если частота дискретизации равна 100 Гц, а число линий спектра равно 200, то разрешение спектра равно $r = 100/200 = 0,5$ Гц.

В линейных системах, с которыми мы обычно имеем дело, частота возмущающей силы совпадает с частотой реакции системы на эту силу. Этот факт позволяет идентифицировать источники вибрации, исследуя спектр виброакустического сигнала.

Надо иметь в виду, что гармонический сигнал, частота которого не кратна минимальной частоте f_d/N , будет иметь в спектре больше одной составляющей (боковые лепестки). Частично подавить их удастся, умножая исходный сигнал на гладкую временную функцию, стремящуюся к 0 на концах промежутка

анализа. Такая функция называется временным окном. Широкое распространение в вибродиагностике получило окно Хемминга, описываемое выражением $0,54 + 0,46 \cos(2\pi k/N)$.

Последовательность y_n называют амплитудным спектром временной последовательности x_n . Так как числа y_n – комплексные, то $y_n = \operatorname{Re}y_n + i\operatorname{Im}y_n$. При этом $(\operatorname{Re}y_n)^2 + (\operatorname{Im}y_n)^2$ является квадратом амплитуды, а $\varphi = \operatorname{arctg}(\operatorname{Im}y_n/\operatorname{Re}y_n)$ – фазой данной гармоники.

Для определения одного элемента ДПФ необходимо выполнить N умножений на комплексные числа и столько же сложений. Следовательно, для нахождения ДПФ требуется выполнить $\sim N^2$ арифметических действий.

Более скоростное и эффективное вычисление спектра обеспечивает быстрое преобразование Фурье (БПФ). В основу его алгоритма положен принцип разбиения (прореживания) исходной последовательности на ряд промежуточных последовательностей. При этом объем вычислений составляет $\sim N \log_2 N$ арифметических действий, если $N=2^k$.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №3.

Принципы построения методов неразрушающего контроля (НК) на основе использования волновых процессов. Классификация видов НК

Большая часть методов технической диагностики основана на измерении и анализе физических параметров колебательных процессов, несущих многообразную информацию о состоянии узлов работающих машин и механизмов и о дефектах в деталях и конструкциях при использовании тестовых воздействий.

Функционирование машин и механизмов сопровождается динамическим взаимодействием деталей и узлов друг с другом, а также с рабочими жидкостями, газами и окружающей средой. При этом возникают механические колебания, гидродинамические пульсации и акустические волны, которые можно измерять посредством различных датчиков. По мере износа узлов машин и развития неисправностей, а также появления трещин и других дефектов в деталях и конструкциях меняются параметры колебательных и волновых процессов. По анализу результатов измерения меняющихся сигналов можно выявлять виды дефектов и степень их развития.

Преимущества использования быстропеременных процессов в диагностических целях по сравнению с медленными процессами:

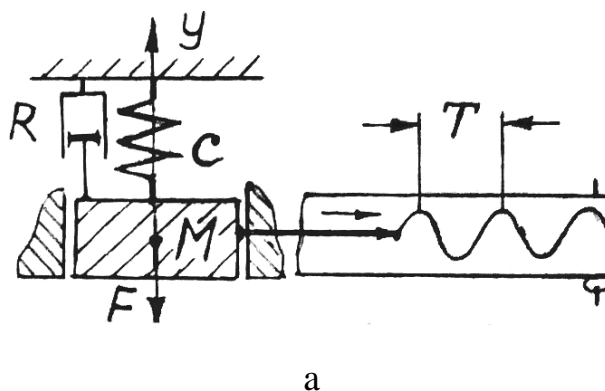
- ввиду большой скорости распространения волн в конструкциях (от 3 до 6 тыс. м в с) сигнал практически мгновенно отражает изменение состояния объекта контроля;
- параметры быстропеременных процессов циклически изменяются во времени, причем число циклов на интервале наблюдения процесса достаточно для достоверных статистических оценок его основных характеристик, что повышает достоверность наблюдений;
- в процессе испытаний машин на переменных режимах работы возможно совпадение частот возмущающих сил со значениями собственных

частот конструкций и усиление колебаний. Это позволяет в ряде случаев выявлять дефекты в деталях без подачи тестовых воздействий.

Основные характеристики колебательных систем

Известно, что любая механическая или акустическая система, имеющая элементы упругости и массы, путем приложения к ней периодической или импульсной силы может быть приведена в колебательное движение. Если периодическая сила действует в течение всего времени, когда совершаются колебания, то они называются вынужденными. Если система, выведенная из равновесия, колеблется под действием внутренних сил, колебания называются свободными. Эти колебания обусловлены попеременным переходом в колебательной системе кинетической энергии в потенциальную и обратно. Кинетическая энергия накапливается элементами массы, потенциальная – упругими элементами. Если в системе имеются потери колебательной энергии (например, демпфирующие элементы), то вследствие рассеяния энергии колебательное движение затухает и система со временем возвращается в положение равновесия.

На рис. 4.1 показаны идеализированная колебательная система (а) и векторное представление гармонического колебательного процесса (б).



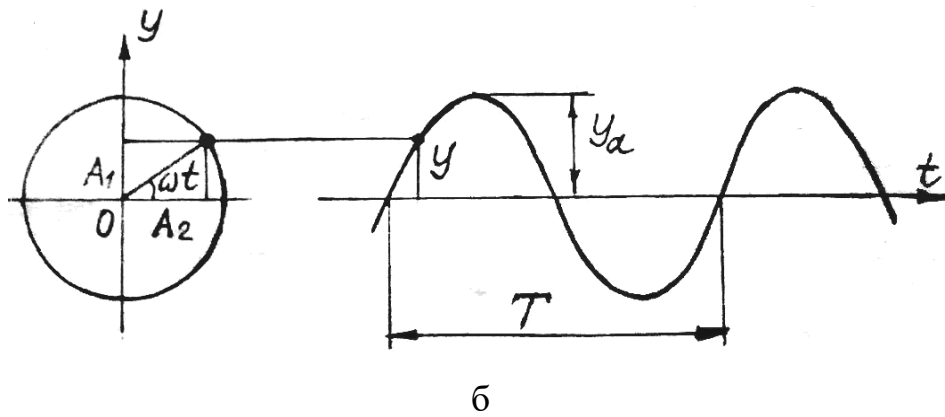


Рис. 4.1. Колебательная система с одной степенью свободы

Естественно, что не все физические системы имеют сосредоточенные параметры. Например, массовые и упругие характеристики балки равномерно распределены по ее длине. Поэтому их можно изучать с помощью расчетной модели, в которой упругое тело приближенно представлено конечным числом сосредоточенных параметров.

Несмотря на ряд ограничений, применение метода сосредоточенных параметров зачастую позволяет отразить реальные физические процессы, происходящие в различных колебательных системах.

В колебательной системе на рис. 2.4, а элемент массы M представлен абсолютно твердым телом, а пружина – жесткостью C , восстанавливающая упругая сила которой пропорциональна величине деформации.

Уравнение сил, действующих внутри системы (при условии отсутствия возмущающей силы F и силы трения), может быть получено согласно второму закону движения Ньютона:

$$My'' + Cy = 0. \quad (4.1)$$

Здесь y – мгновенное значение колебательного смещения (деформации) пружины; y'' – мгновенное значение колебательного ускорения массы, равное второй производной от колебательного смещения времени.

Уравнение (4.1) называется уравнением собственных колебаний системы. Общее решение этого уравнения имеет вид:

$$Y = A_1 \sin \omega t + A_2 \cos \omega t,$$

где A_1 и A_2 – произвольные постоянные интегрирования, их значения можно найти из начальных условий, зная значения y и $\partial y/\partial t$ в начальный момент времени ($t=0$):

$$(\partial y/\partial t)_{t=0} = A_1 \omega, \quad y(0) = A_2.$$

Общее решение можно свести к простейшему виду:

$$y = y_a \sin(\omega t + \varphi), \quad (4.2)$$

где $y_a = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}$ – амплитуда колебательного смещения; $\varphi = \arctg(A_2/A_1)$ – начальная фаза колебаний; $(\omega t + \varphi)$ – полная фаза колебаний.

На рис. 4.4, б показано образование кривой гармонических колебаний, где y_a является амплитудой вращающегося радиус-вектора, проекция которого на вертикальную ось дает синусоидальную функцию; t – время, ω – круговая частота – число полных колебаний за 2π с.

Фаза колебаний характеризует состояние колебательного процесса в определенный момент времени. Если колебания непрерывны, то фаза колебаний повторяется через каждый период.

Одной из важнейших характеристик колебательного движения является период колебаний T (время одного полного колебания), связанный с круговой частотой отношением:

$$T = 2\pi / \omega. \quad (4.3)$$

В технических приложениях чаще всего используется не период колебаний, а обратная ему величина – частота колебаний f , показывающая количество полных колебаний в секунду. Частота выражается в герцах и равна:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}. \quad (4.4)$$

Используя уравнение (2.2), можно получить выражение мгновенного значения колебательной скорости массы. Эта скорость равна первой производной от колебательного смещения по времени

$$y' = \frac{\partial y}{\partial t} = y_a \omega \cos \omega t = y_a' \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}), \quad (4.5)$$

$$\text{где } y_a' = y_a \omega. \quad (4.6)$$

Из (4.5) видно, что вектор колебательной скорости сдвинут по фазе на угол 90° относительно вектора колебательного смещения.

Колебательное ускорение массы

$$y'' = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = y_a \omega^2 \sin \omega t = y_a'' \sin \omega t, \quad (4.7)$$

$$\text{где } y_a'' = -y_a \omega^2. \quad (4.8)$$

Амплитуда колебательного ускорения численно превышает амплитуду колебательного смещения в ω^2 раз. Знак минус указывает на то, что направление вектора колебательного ускорения противоположно направлению вектора колебательного смещения (сдвиг фаз составляет 180°).

Теперь можно найти частоту собственных колебаний системы путем подстановки выражений (4.2) и (4.7) в (4.1):

$$\omega_0 = \sqrt{c/M}.$$

С учетом соотношений ω и f получим выражение частоты собственных колебаний f_0 системы в виде

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{c/M} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{G}} g,$$

где G – вес колебательной массы; g – ускорение силы тяжести.

Рассмотрим колебания системы (4.1) с учетом сил трения. Такие колебания называются свободными. Уравнение свободных колебаний имеет вид:

$$My'' + Ry' + Cy = 0, \quad (4.9)$$

где R – коэффициент трения.

Свободные колебания массы M возникают при кратковременном (импульсном) воздействии. Со временем они затухают под действием силы трения, пропорциональной колебательной скорости.

В случае воздействия на колебательную систему внешней периодической возмущающей силы F возникают вынужденные колебания массы M .

Уравнение, описывающее эти колебания, имеет вид:

$$My'' + Ry' + Cy = F, \quad (4.10)$$

где F – возмущающая сила.

Гармоническая возмущающая сила может быть задана в форме экспоненциальной функции:

$$F = F_a e^{j\omega t}. \quad (4.11)$$

Здесь F_a – амплитуда силы; e – основание натуральных логарифмов, $e = 2,718$;

j – мнимая единица, $j = \sqrt{-1}$.

Выразим в экспоненциальной форме виброускорение и вибросмещение через колебательную скорость для установившихся вынужденных колебаний:

$$y = \frac{y'}{j\omega} = -j \frac{y'_a e^{j\omega t}}{\omega}; \quad y'' = j\omega y' = jy'_a e^{j\omega t}. \quad (4.12)$$

Подставим эти выражения в формулу (4.10) и после сокращения получим:

$$j\omega My'_a + Ry'_a - j(c/\omega)y'_a = F_a, \quad (4.13)$$

отсюда амплитуда колебательной скорости равна:

$$y'_a = \frac{F_a}{j(\omega M - c/\omega) + R}. \quad (4.14)$$

Выражение в знаменателе (4.14) называется полным механическим сопротивлением системы (или импедансом) Z :

$$Z = j(\omega M - c/\omega) + R = \frac{F_a}{y'_a}. \quad (4.15)$$

Импеданс есть отношение колебательной силы к вызванной этой силой колебательной скорости массы M и имеет комплексный характер. Размерность импеданса Н с/м.

Механическое сопротивление массы установившемуся колебательному движению пропорционально частоте колебаний:

$$Z = Z_M = j\omega M,$$

а механическое сопротивление элементов упругости и трения равно:

$$Z_c = -j\frac{c}{\omega} = \frac{c}{j\omega}, \quad Z_T = R.$$

Масса обуславливает сдвиг фазы колебательной скорости относительно колебательной силы на 90° в одну сторону, а упругость – на 90° в другую сторону. При действии одной лишь силы трения сдвиг фазы отсутствует.

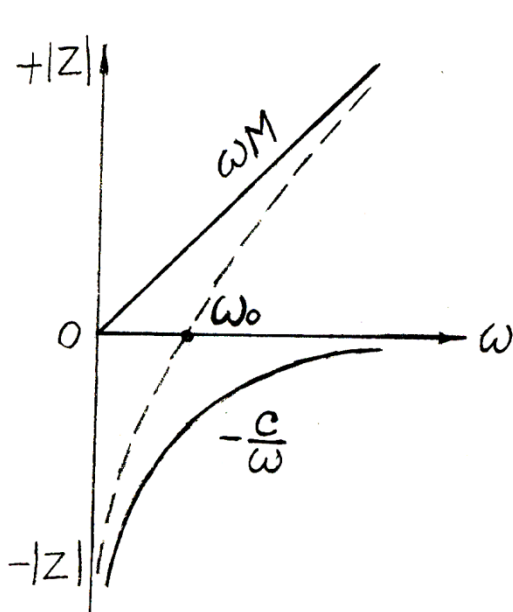
Сопротивление трения называется активным (из-за необратимых потерь энергии), а сопротивления массы и упругости, вызывающие лишь появление сдвига фазы между силой и скоростью, но не потерю энергии, – реактивными.

На рис. 4.2, а изображена частотная зависимость амплитуд составляющих механических сопротивлений массы и упругости. Видно, что на определенной частоте суммарное сопротивление системы без трения проходит через нуль.

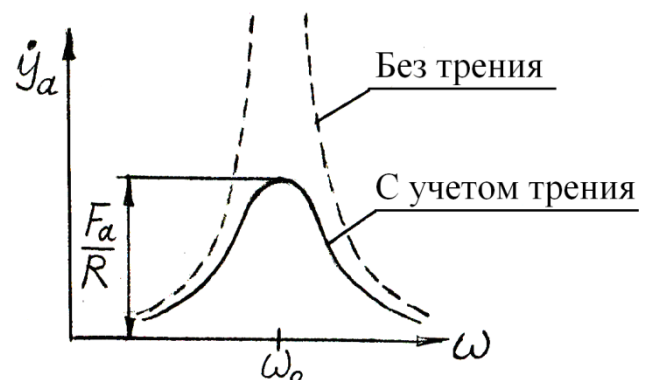
Это будет частота резонанса системы, которая может быть найдена из выражения:

$$\omega_0 M = \frac{c}{\omega_0}; \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{c}{M}} \quad \text{или} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{M}}.$$

Резонансная частота такой системы равна частоте собственных колебаний.



а



б

Рис. 4.2. Частотные характеристики импеданса (а) и оценка амплитуды виброскорости на резонансе(б)

На частоте резонанса реактивное сопротивление системы равно нулю. Колебательная скорость массы на резонансе:

$$y'_a = \left| y'_{a \text{ рез}} \right| = \frac{F_a}{R}.$$

Если трение в системе отсутствует, то колебательная скорость на резонансной частоте беспрдельно увеличивается. Чем больше выражены потери, тем слабее выражен резонанс (рис. 4.2, б).

Колебания системы с трением при отсутствии внешнего возбуждения ($F=0$) называются свободными.

Круговая частота свободных колебаний системы при небольшом коэффициенте сопротивления может быть выражена в виде

$$\omega_0^* = \sqrt{\omega_0^2 - \beta_0^2},$$

где ω_0 – частота собственных колебаний системы (при отсутствии затухания, $R=0$), $\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{M}}$; β – коэффициент затухания, $\beta = \frac{R}{2M}$.

Известно, что вибросигнал может быть при помощи стандартных математических операций преобразован в виброускорение, виброскорость или виброперемещение контролируемой точки механизма или конструкции. Рассмотрим информативность различных представлений вибросигналов и соответствующие единицы измерений.

На низких и средних частотах для количественного описания вибросигналов наиболее широко используются виброперемещение и виброскорость.

Виброскорость показывает максимальную скорость перемещения контролируемой точки в процессе ее прецессии, измеряется в мм/с.

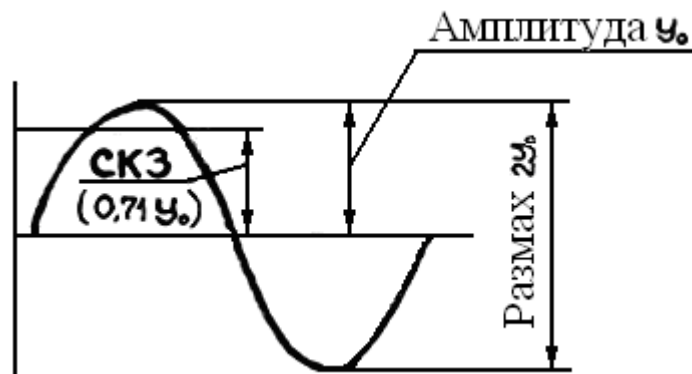
Виброскорость есть мера кинетической энергии колебательного процесса, так как энергия пропорциональна квадрату скорости.

В качестве меры виброскорости используется не максимальное ее значение, а СКЗ от всех мгновенных значений за определенный интервал времени T :

$$y'_{эф} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} y'^2(t) dt}.$$

Это – равноценная по энергии величина постоянного во времени параметра. Эффективное значение виброскорости позволяет привести к единому эквиваленту как детерминированные, так и случайные колебания, допуская их сравнение. Параметр виброскорости позволяет одновременно учитывать и перемещение контролируемой точки, и энергетическое воздействие на опоры от динамических сил, вызвавших вибрацию. На высоких частотах параметр виброускорения характеризует то силовое воздействие, которое вызвало данную вибрацию. Виброускорение принято измерять в m/c^2 .

На рис. 4.3 сопоставлены рассмотренные параметры колебания.



Физический смысл	Единицы измерений	Представление	Вычисление
Размах колебаний	мкм	Размах	$2y_0$
Энергия $E = ky$	мм/с	СКЗ	$\frac{\sqrt{2}}{2} \dot{y}_0$
Силы	m/c^2	Пик	\ddot{y}_0

Рис.4.3. Параметры для синусоидального процесса

Виды неразрушающего контроля

Техническая диагностика предусматривает использование только тех методов, которые не требуют разрушения деталей. Таким образом, методы НК применялись также для технической диагностики, только основаны эти методы на возбуждении в контролируемых узлах тестовых сигналов (обуславливающих взаимодействие физических полей или веществ с контролируемым объектом) и определении вида дефекта по анализу результатов этого взаимодействия.

Наиболее широко используются ультразвуковые методы НК, электромагнитные, магнитные, оптические и радиационные, методы течеискания и акустической эмиссии.

Оптико-визуальные методы позволяют определить широкий спектр дефектов наиболее нагруженных узлов и деталей двигателей и конструкций. Особенно расширяет возможности оптического контроля применение различных эндоскопов, вводимых через специальные горловины в конструкцию, например, в рабочие полости камер сгорания или проточную часть газовых турбин.

Приведенный перечень методов технического диагностирования свидетельствует о том, что практически многие функциональные и тестовые методы построены на использовании свойств волновых процессов.

Для лучшего понимания теоретических основ этих методов целесообразно рассмотреть прикладные вопросы теории колебаний и волн.

Функциональные и тестовые методы технического диагностирования

Классификация методов и средств диагностирования осуществляется в зависимости от характера взаимодействия объекта и средства диагностирования, от типа физических полей, взаимодействующих с контролируемым объектом, от вида регистрируемых параметров.

Система диагностирования включает объект диагноза, средства и методы диагностирования. Под средствами диагностирования понимается комплекс аппаратных и программных средств для измерения и анализа диагностической информации объекта контроля на всех этапах его жизненного цикла.

Вначале рассмотрим общую характеристику методов с целью обоснования выбора теоретических предпосылок к изучению дисциплины.

По взаимодействию объекта и средства диагностирования различают функциональные и тестовые методы.

Функциональные методы применяются для диагностирования объекта в его рабочем режиме. Информация о состоянии объекта снимается с помощью датчиков. В связи с этим никакие воздействия на объект со стороны средства диагностирования не подаются. Этим они отличаются от тестовых методов, при которых на вход объекта подается сигнал или группа сигналов для возбуждения в нем процессов, информирующих о его техническом состоянии.

Функциональные методы удобно рассматривать на примере одного из самых сложных узлов ВС – газотурбинного двигателя (ГТД).

Методы подразделяются по названию физических процессов, на которых они основаны:

- диагностирование по изменению рабочих (газодинамических) параметров;
- диагностирование состояния узлов ГТД, работающих в масле по продуктам износа и по параметрам маслосистемы;
- виброакустическая диагностика.

Диагностическая информативность колебаний волн

Наибольшей информативностью обладают методы, основанные на анализе узкополосных спектров вибрации или шума, измеренных при работе механизмов и агрегатов. Следует отметить, что информативность диапазонов низких,

средних и высоких частот различна. Одни неисправности генерируют вибрацию в низкочастотной части спектра, другие – в области средних частот, а третьи – в высокочастотной зоне. Базовой величиной для спектральных оценок вибрации является частота вращения ротора агрегата или механизма, называемая оборотной частотой ротора.

В сложных агрегатах типа редуктора может присутствовать несколько оборотных частот.

Существенное значение для диагностики состояния механизмов имеют первая и вторая гармоники частоты вращения ротора. Обычно первая гармоника свойственна остаточной неуравновешенности ротора. Вторая гармоника, как правило, обусловлена недостаточной центровкой спаренных агрегатов или дефектом крепления механизма к опорным конструкциям.

Диапазон средних частот располагается выше 2-й гармоники и примерно до 10-й гармоники частоты вращения ротора.

Гармоники здесь возникают при механических дефектах, ослабленных посадках, внутренних динамических ударах в оборудовании.

Анализ распределения вибрационной энергии в этом диапазоне обычно позволяет судить о внутреннем механическом состоянии данного механизма, о качестве его изготовления и сборки. Вибрация в этой зоне чаще всего возрастает при наличии механических ослаблений и задеваний внутри механизма. Высокочастотная часть спектра (выше 10-й гармоники частоты вращения) содержит информацию об аэродинамических и гидродинамических процессах внутри механизмов, о дефектах лопаточных систем, зубчатых передач, подшипников качения и скольжения, а также о состоянии уплотнений и других систем.

Развитие дефектов в узлах механизмов сопровождается появлением в сигнале вибрации амплитудной и угловой модуляций, которые идентифицируются по появлению в спектре боковых составляющих

относительно несущей. В ряде случаев возникает такой вид модуляции, при котором высокочастотная шумовая несущая модулируется гармоническим или периодическим процессом.

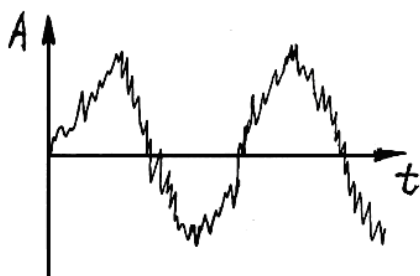
Спектр результирующего сигнала представляет собой свертку спектров несущего и модулирующего процессов. Однако наблюдать отдельно эти составляющие спектров можно лишь в случае анализа узкополосного спектра огибающей сигнала, выделенного полосовым фильтром. В прямом спектре сигнала они не могут быть определены.

Метод диагностирования состояния узлов механизма по спектру огибающей вибрации находит все более широкое применение в технической диагностике, особенно для подшипников качения. Суть метода заключается в том, что дефекты в узлах трения приводят к росту высокочастотного шума, связанного с пульсациями сил трения, происходящими с частотами, кратными числу дефектов, приходящихся на один оборот вала.

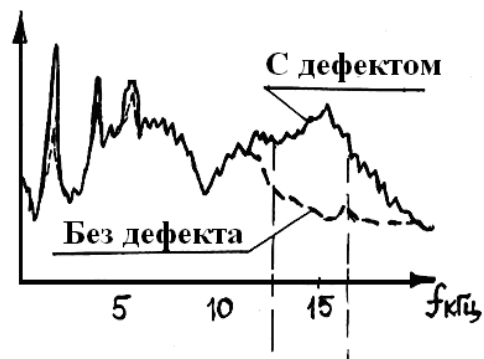
На рис. 4.4 показана последовательность обработки сигнала для определения дефектов по спектру огибающей вибрации.

Вначале определяется полоса частот $[0, f_B]$, содержащая информативные низкочастотные составляющие виброакустического сигнала.

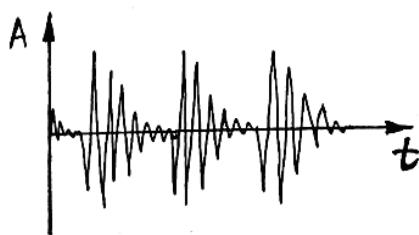
Затем в области высоких частот полосовым фильтром выделяется полоса с центральной частотой $f_H \gg f_B$ и третьоктавной шириной (ширина полосы в конкретных случаях может быть и другой). Центральная частота полосы или совпадает с частотой гармонической несущей (например, с зубцовой частотой редуктора), или является центральной частотой узкополосного случайного шума (например, шумов трения в подшипниковых узлах) (рис.4.4, б).



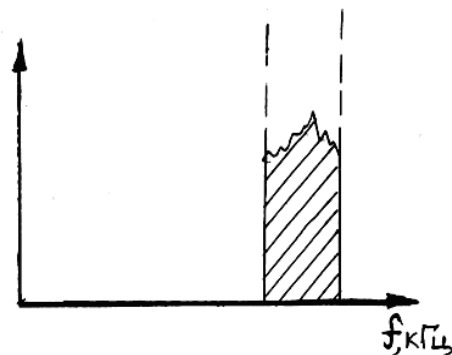
а



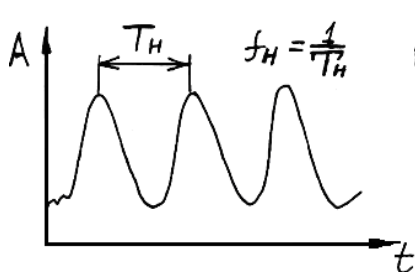
б



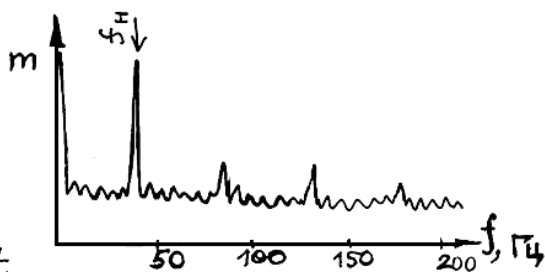
в



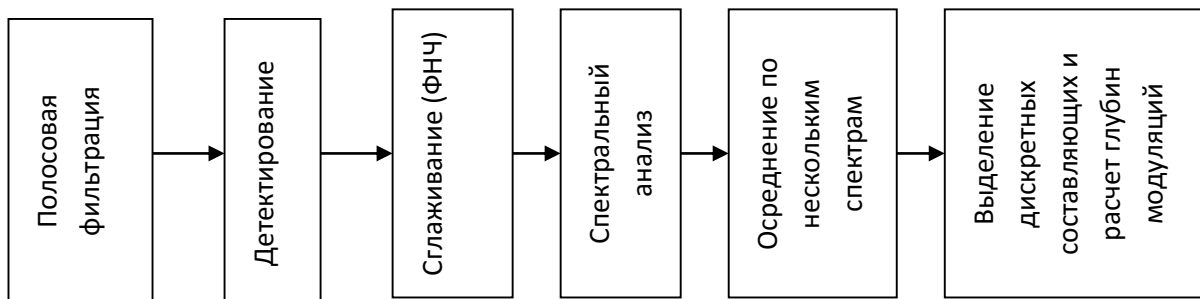
г



д



е



ж

Рис.4.4. Последовательность обработки сигнала для выявления дефектов механизма по спектру огибающей вибрации:

а – исходный сигнал; б – спектр вибрации механизма с дефектом и без дефекта; в – сигнал после полосовой фильтрации; г – спектр сигнала после полосовой фильтрации; д – огибающая сигнала; е – спектр огибающей; ж – схема обработки сигнала

Далее производится детектирование узкополосного сигнала, т.е. переход к его абсолютной величине (рис.4.4, д). Полученный сигнал сглаживается посредством пропускания через фильтр низких частот с частотой среза f_v и разлагается в спектр (рис.4.4, е). Вид дефектов определяется по анализу спектра огибающей, которая, как правило, позволяет выявить дефекты механизмов, связанных с появлением ударных импульсов, т.к. они приводят к выраженным модуляциям высокочастотных полос. Также можно проводить порядковый анализ огибающей во временной области (например, при диагностировании поршневых двигателей) или исследовать ее спектр (при диагностировании редукторов, роторных механизмов и подшипниковых узлов).

В диапазоне низких частот следует отметить зону субгармоник, лежащую ниже оборотной частоты ротора. Наибольший интерес в этой зоне представляют «целые» субгармоники с частотой, равной $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, \frac{1}{4}$ от оборотной частоты. Они возникают при определенных дефектах состояния оборудования. Физически субгармоники соответствуют таким вибрационным процессам в механизмах, которые синхронно связаны с частотой вращения ротора, но одно полное колебание в таком процессе завершается не в течение одного оборота ротора, а за большее количество оборотов. Примером является появление колебаний с частотой вращения сепаратора подшипника качения $f \approx 0.42...0.48$ от оборотной частоты ротора. Дробные гармоники могут свидетельствовать о задевании, трещинах в фундаментных конструкциях и т.п.

Увеличение вибрации на роторной частоте происходит по следующим причинам:

- недостаточная динамическая балансировка ротора;
- разрушение и деформация лопаток ротора;
- коробление деталей ротора вследствие неравномерного их прогрева при работе;
- износ или разрушение деталей подшипников опор ротора;
- ослабление посадки деталей на роторе (если посадка ослаблена по достижении определенной скорости вращения роторов, то на этой скорости отмечается резкий скачок роста уровня вибрации);
- задевание деталей ротора о неподвижные части. В этом случае появляется нестабильность вибрации ротора во времени. Форма осциллограммы, размах и частота вибрации непрерывно меняются, в спектрограмме появляется составляющая на частоте задевания, которая флюктуирует во время работы.

В случае начала или развития разрушения подшипников опор ротора двигателя помимо изменения и роста вибрации растет температура масла на выходе из опор, появляются посторонние частицы в масле, меняется время выбега ротора.

В реальных условиях работы двигателя имеется много источников вибрации с периодическими и случайными составляющими, которые могут маскировать роторную вибрацию двигателя на рабочем режиме. Учитывая рост уровня вибрации на роторной частоте в области резонанса ω_0 , представляется перспективным диагностировать состояние лопаток ротора на выбеге, когда, с одной стороны, снизятся вибропомехи от рабочего процесса, а с другой стороны, при проходе через резонанс ротора на упругих опорах возрастет амплитуда колебаний на роторной частоте.

Дефекты лопаток проявляются не только на частоте вращения ротора, но и в области более высоких частот в виде модуляции колебаний с несущей лопаточной частотой.

Причиной модуляции, помимо обрыва лопаток, может быть проявление других дефектов лопаток типа трещин, деформаций.

Во всех случаях увеличиваются амплитудная и частотная модуляции возмущающих сил, что связано с усилением взаимодействия различных колебательных процессов друг с другом.

Несущей является «лопаточная» частота $\Omega = n\omega$, где n – число лопаток ротора, ω – угловая частота вращения ротора.

В качестве модулирующего процесса выступает обратная частота ротора ω и кратные гармоники $K\omega$.

Математическая модель этого процесса может быть представлена в виде виброакустического сигнала со смешанной модуляцией:

$$Z(t) = A(1 + \sum_k m_k \cos k\omega t) \cos(\Omega t + \chi \sin \omega_n t).$$

Здесь m_k – парциальные глубины амплитудной модуляции; χ – индекс модуляции, $\chi = m_n \frac{\Omega}{\omega_n}$; m_n – глубина угловой модуляции с частотой ω_n .

Частотная модуляция возникает при деформации лопаток (развороте). В случае отсутствия частотной модуляции модулирующая функция принимает вид

$$Z(t) = A \left[\sin \Omega t + \sum_k \frac{m_k}{2} \sin(\Omega - k\omega)t + \sum_k \frac{m_k}{2} \sin(\Omega + k\omega)t \right].$$

На рис.4.5 представлены сигнал и спектр вибрации ротора с дефектной лопаткой, смоделированные на основании приведенной формулы.

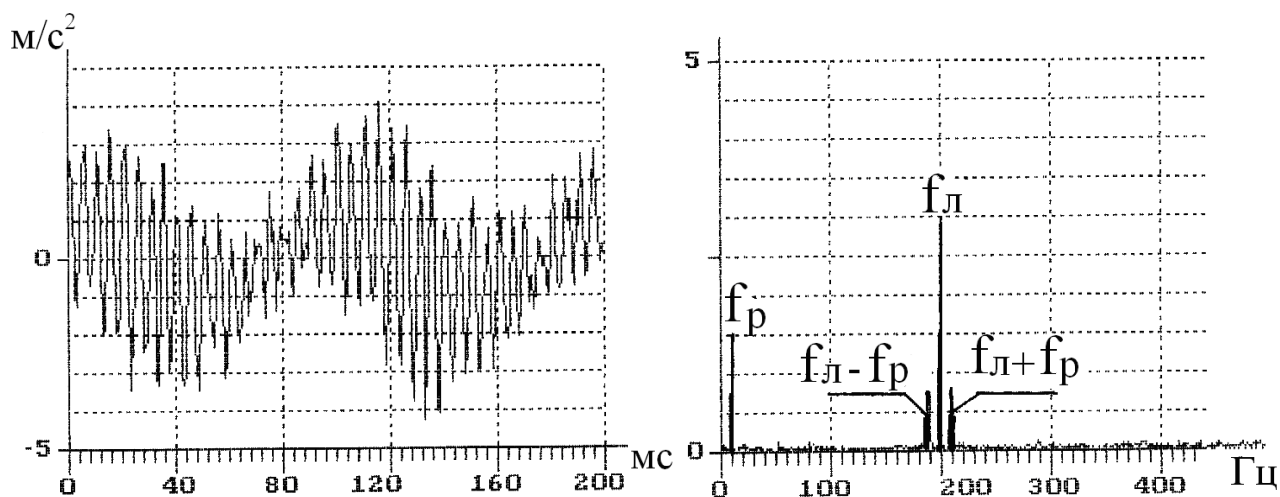


Рис.4.5. Моделирование дефекта лопатки ротора турбины

Видно, что дефект лопатки, например, в виде трещины приводит к появлению симметрично расположенных «боковых» частот относительно «несущей» лопаточной частоты.

Степень развития этого дефекта оценивается глубиной амплитудной модуляции по формуле

$$m_p = \frac{S(f_l - f_p) + S(f_l + f_p)}{S_{f_l}}.$$

Здесь S_{f_l} – амплитуда несущей («лопаточной») частоты; $S(f_l - f_p)$ и $S(f_l + f_p)$ – амплитуды боковых составляющих спектра вибрации.

Дефекты зубчатых передач

Различают дефекты изготовления, сборки и износа зубчатых передач.

К основным дефектам изготовления и сборки относятся:

- погрешность шага и профиля зуба;
- накопленная погрешность;

- радиальное биение зубчатого венца;
- несоосность зубчатых колес;
- погрешность пятна контакта;
- дисбаланс колес.

К дефектам износа относятся:

- питтинг (точечное выкрашивание рабочих поверхностей зубьев);
- сколы зубьев;
- изнашивание зубьев.

При работе нормальной зубчатой передачи генерируется вибрация на частоте пересопряжения зубьев сопрягаемых колес f_z . Это связано с переменной жесткостью зацепления по фазе зацепления, так как попеременно в зацеплении одновременно находится либо два зуба (однопарное зацепление), либо четыре зуба (двупарное зацепление). Также в режиме нормального функционирования генерируется вибрация на частоте вращения зубчатого колеса f_k из-за остаточной неуравновешенности.

На рис.4.6 показаны временная реализация и спектр исправной зубчатой передачи (расчетная модель). Для наглядного представления временной реализации не учитывается дисбаланс 2-го колеса.

Видно, что при исправном состоянии зубчатой передачи происходит сложение двух процессов (аддитивная смесь сигналов) и в спектре содержатся в основном две дискретные составляющие: одна на зубцовой частоте, другая на частоте вращения шестерни.

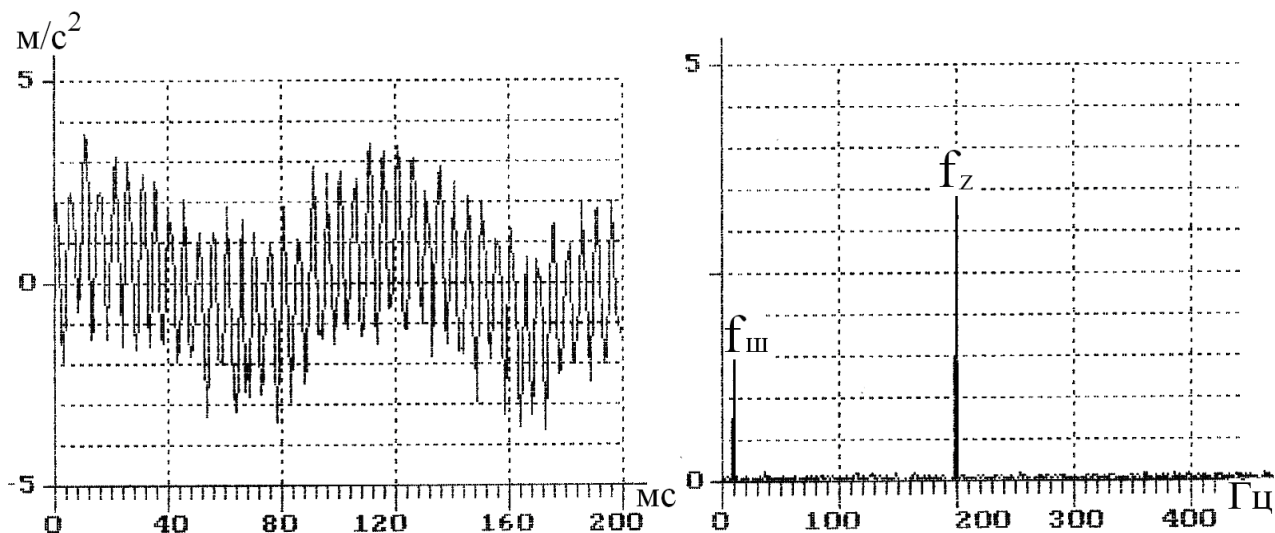


Рис.4.6. Сигнал и спектр вибрации исправной зубчатой передачи

На рис.4.7 приведены результаты моделирования дефекта в виде эксцентриситета зубчатого венца шестерни или несоосности сопрягаемых колес. Оба вида дефекта приводят к появлению амплитудной модуляции. При этом несущий сигнал имеет частоту зацепления, а модулирующий сигнал – частоту вращения дефектного колеса.

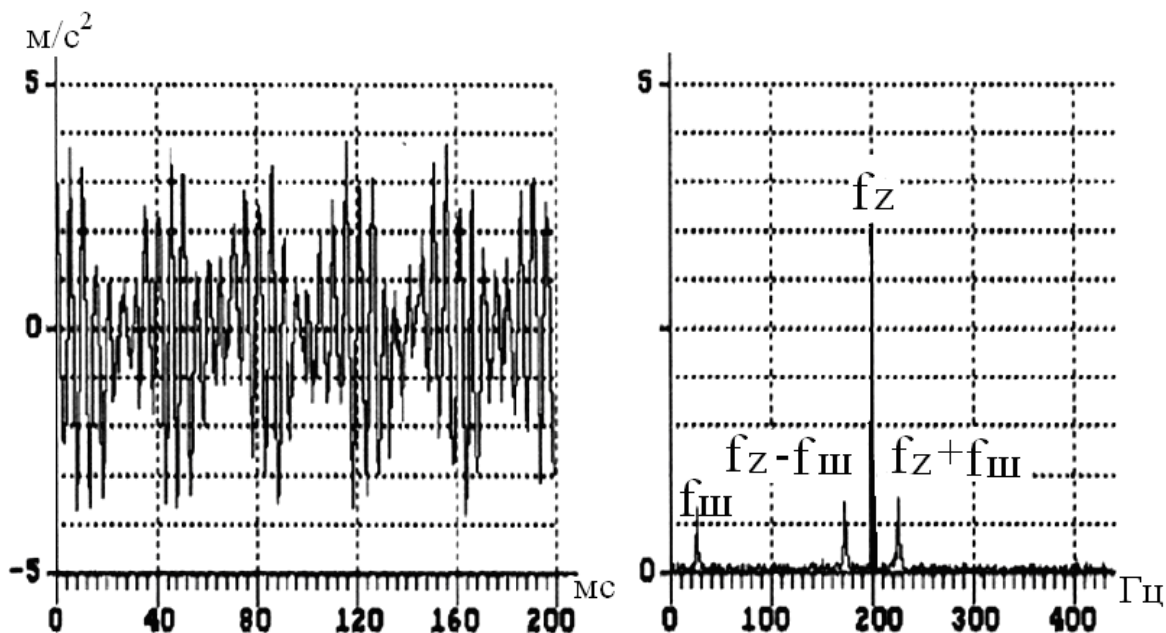


Рис.4.7. Моделирование дефекта эксцентриситета зубчатого венца шестерни

В случае изнашивания зубьев появляются интенсивные гармоники частоты пересопряжения зубьев шестерни (рис. 4.8). Степень развития дефекта

оценивается дискриминантом вида: $\chi = \frac{\sum_{n=2}^N S_{nfz}}{S_{fz}}$, т.е. как отношение суммы

амплитуды гармоник 2-й и выше к амплитуде 1-й гармоники.

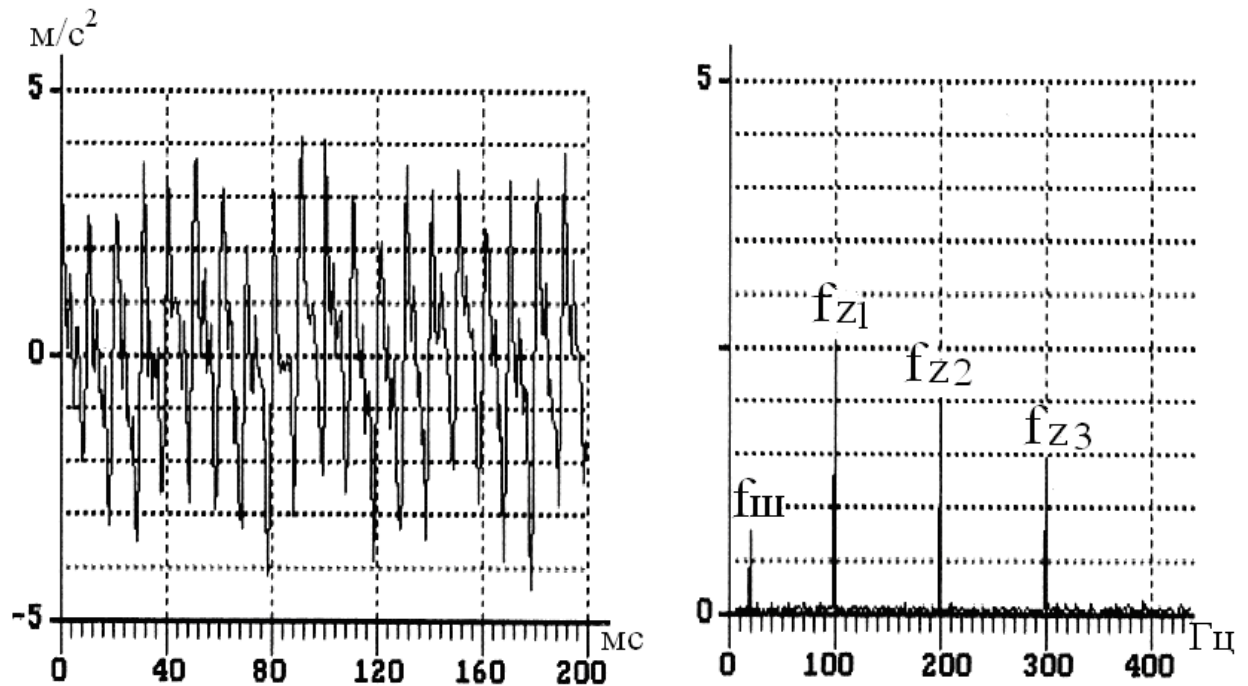


Рис.4.8. Моделирование износа зубьев

Дефекты подшипниковых узлов

В процессе развития дефектов в подшипнике качения меняется соотношение импульсных и шумовых компонентов в измеряемом вибросигнале. Можно условно выделить пять стадий развития дефекта. На рис.4.9 представлена зависимость уровней пиковых и фоновых значений виброскорости корпуса механизма от времени по мере деградации подшипника.

1-я стадия соответствует началу развития дефекта, при котором появляются ударные импульсы, растущие по величине, а фоновые вибрации

остаются неизменными. Энергия виброимпульсов затрачивается на «углубление» дефекта.

2-я стадия характеризуется тем, что ударные импульсы достигают по своей энергии практически максимального значения.

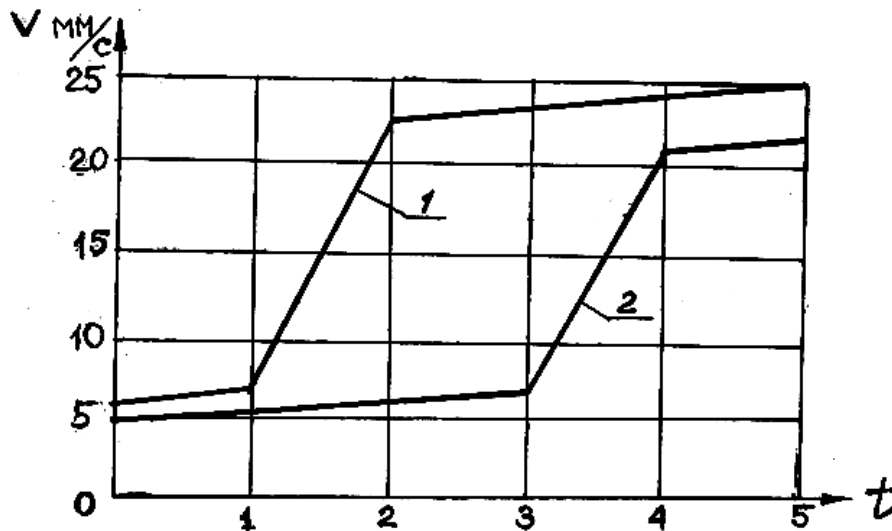


Рис.4.9. Стадии развития дефектов в подшипнике качения:

1 – изменение пиковых уровней; 2 – изменение уровня фона

Выделяющаяся в подшипнике энергия импульсов уже столь велика, что ее достаточно для расширения зоны локализации дефекта. На данной стадии остановить дальнейшее развитие дефекта практически невозможно. Величина пиков во временном сигнале не растет, но и уровень фона еще меняется мало.

3-я стадия – это переход подшипника к полной деградации. Зона развития дефекта столь велика, что подшипник начинает терять свое назначение – обеспечивать вращение вала с минимальным трением. Увеличиваются затраты энергии на вращение ротора и как результат увеличивается энергия, выделяющаяся в подшипнике, растет уровень фона, свидетельствующий о саморазрушении подшипника.



4-я стадия – последний этап развития дефекта. Уровень фона почти сравнивается с уровнем пиков. Работа подшипника в этой зоне недопустима.

5-я стадия – это этап ожидания аварии, чаще всего с большими последствиями. Например, в момент заклинивания разрушенного подшипника происходит задир вала в месте крепления обоймы.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №4.

Ультразвуковая дефектоскопия (УЗД). Вихретоковый метод НК.

Упругие волны

Как известно, упругой волной называют процесс распространения возмущений в упругой среде. Частицы среды при этом колеблются относительно своих положений равновесия, а процесс распространения возмущений заключается в последовательной передаче колебательного состояния от одних частиц к другим.

Скорость передачи колебательного состояния от одних частиц к другим называется скоростью распространения упругих волн. При этом надо иметь в виду, что скорость распространения волн на несколько порядков выше колебательной скорости частиц упругой среды. В безграничном твердом теле различают продольные и поперечные упругие волны в зависимости от того, движутся ли частицы около своих положений равновесия вдоль или поперек направления распространения волны.

Наличие двух видов волн в твердом теле объясняется тем, что упругие силы возникают в нем при искажении как объема (сжатие), так и формы (сдвиг).

$$\text{Скорость продольных волн } v_1 = \sqrt{\frac{E(1-\delta)}{\rho(1+\delta)(1-2\delta)}}, \text{ а скорость поперечных}$$
$$\text{волн } v_2 = \sqrt{G/\rho}.$$

Здесь E – модуль Юнга; G – модуль сдвига; ρ – плотность массы; δ – коэффициент Пуассона.

В отличие от твердых тел в жидкостях и газах упругие силы возникают лишь при искажении объема, вследствие чего в них могут иметь место только продольные волны.

Скорость распространения этих волн:

$$\text{- для жидкостей } v_1 = \sqrt{\frac{K}{\rho}};$$

- для продольной волны в газе $v_1 = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho}}$,

где K – модуль всестороннего сжатия жидкости; P_0 – статистическое давление в газе; γ – отношение удельных теплоемкостей газа при постоянных давлении и скорости.

Характерной особенностью скорости звуковых волн в жидкости и газе являются практическое отсутствие зависимости ее значения от статического давления и температуры для жидкости и сильная зависимость от этих параметров для газа. Наличие в жидкости газовых пузырьков существенно уменьшает ее модуль K , что соответственно уменьшает и скорость звуковых волн, распространяющихся в ней. Так, при содержании в воде 0,1% воздуха скорость звука снижается с 1500 до 400 м/с (при атмосферном давлении).

Наличие в реальных конструкциях (стержнях, пластинах и оболочках) границ приводит к появлению в них дополнительных типов упругих волн.

В частности, в стержнях возможны три типа упругих волн: продольные, изгибные (поперечные) и крутильные. В пластинах также возможны три типа волн: продольные, изгибные и сдвиговые.

Поверхность оболочки может совершать поперечные, продольные и касательные перемещения.

Рассмотрим волновой процесс на примере распространения синусоидальной поперечной волны со скоростью возмущения вдоль длинного тонкого стержня, с которым совместим ось X (рис.5.1).

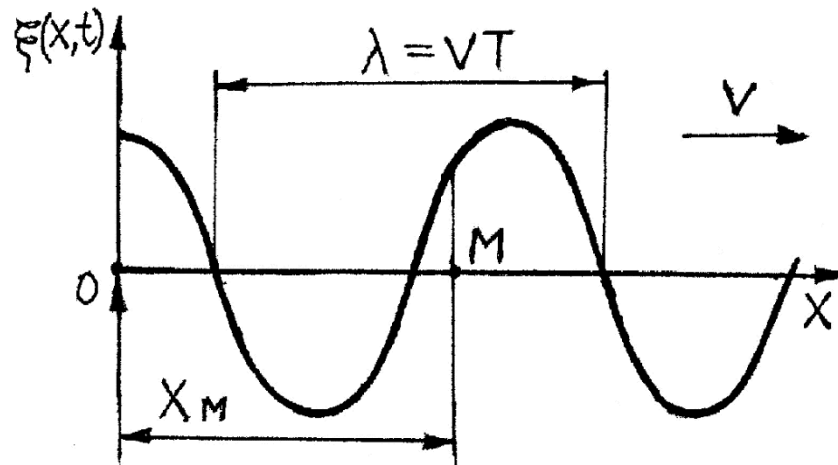


Рис. 5.1. Распространение возмущения вдоль тонкого стержня

Представим смещение элементов стержня из положения равновесия как функцию координаты x и времени t , т.е. $\xi = f(x, t)$. График этой функции похож на график гармонического колебания, хотя имеется существенное отличие, заключающееся в том, что смещение при гармонических колебаниях зависит только от времени.

В точке 0 находится источник колебаний. В точку M , удаленную на расстояние X_M от источника, возмущение приходит с некоторым запаздыванием. Запишем уравнение смещения в точке 0 :

$$\xi(0) = a \cos(\omega t),$$

где t – время, отсчитываемое с момента начала колебаний в точке 0 .

В точке M колебание происходит по аналогичному закону:

$$\xi(M) = a \cos(\omega t_1),$$

где t_1 – время, отсчитываемое с момента начала колебаний в точке M .

Очевидно, что t_1 меньше t на промежуток времени τ , за который волна успевает пройти расстояние $0M = X_M$, то есть $\tau = X_M/v$. Таким образом, с учетом того, что точка M произвольна, уравнение гармонической волны можно записать в следующем виде:

$$\xi(x_t) = a \cos \omega(t - x/v), \quad (5.1)$$

где v – скорость распространения волны.

Это – уравнение волны, распространяющейся в положительном направлении оси X . Уравнение гармонической волны, распространяющейся в противоположном направлении, имеет вид:

$$\xi(x_t) = a \cos \omega(t + x/v).$$

Здесь a – амплитуда волны; ω – циклическая (круговая) частота колебаний частиц среды (радиан/с).

Эта волна периодична во времени и пространстве, т.к. функция периодична и ее период равен 2π .

Из периодичности в пространстве $\omega = \Delta x/v = 2\pi$ находим $\Delta x = 2\pi v / \omega = vT$.

Расстояние Δx называют длиной волны λ . Длина волны – это расстояние между ближайшими точками среды, колеблющимися с разностью фаз 2π . Другими словами, это расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний T (рис. 5.1):

$$\lambda = vT \text{ или } \lambda = v/f. \quad (5.2)$$

Уравнение гармонической волны принято записывать в симметричном более удобном и простом виде. Для этого внесем ω в скобку, тогда

$$\omega t - \omega x/v = \omega t - kx,$$

где $k = \omega/v = 2\pi/Tv$ или $k = 2\pi/\lambda$.

Величину k называют волновым числом. Тогда уравнение гармонической волны примет вид:

$$\xi = a \cos(\omega t - kx). \quad (5.3)$$

Скорость распространения возмущения v – это фазовая скорость волны, т.е. скорость, с которой распространяется определенное значение фазы волны, $\varphi = \omega t - kx$. Именно фаза характеризует определенное состояние движения частиц среды при прохождении волны.

С учетом затухания энергии волны при распространении уравнение волны будет иметь вид:

$$\xi = a_0 e^{-\gamma x} \cos(\omega t - kx), \quad (5.4)$$

где γ – коэффициент затухания волны (M^{-1}).

Уравнение (4.1) описывает и плоскую волну в упругой среде. В плоской волне волновые поверхности (где точки среды колеблются в одинаковой фазе) имеют вид плоскостей. При распространении плоской волны вдоль оси X ее волновые поверхности перпендикулярны этой оси.

В случае распространения плоской волны в произвольном направлении, характеризуемом единичным вектором n (рис.5.2), выражение (5.1) преобразуется к виду:

$$\xi = f(t - r/v) = f(t - r n/v), \quad (5.5)$$

где $r n = x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma$, α , β , γ – углы между вектором n и осями координат.

Для гармонической волны $\cos(\omega t - r n/v) = \cos(\omega t - r n \omega/v)$,

тогда $\xi = a \cos(\omega t - Kr)$, где K – волновой вектор,

$$K = (\omega/v)n = (2\pi/\lambda)n. \quad (5.6)$$

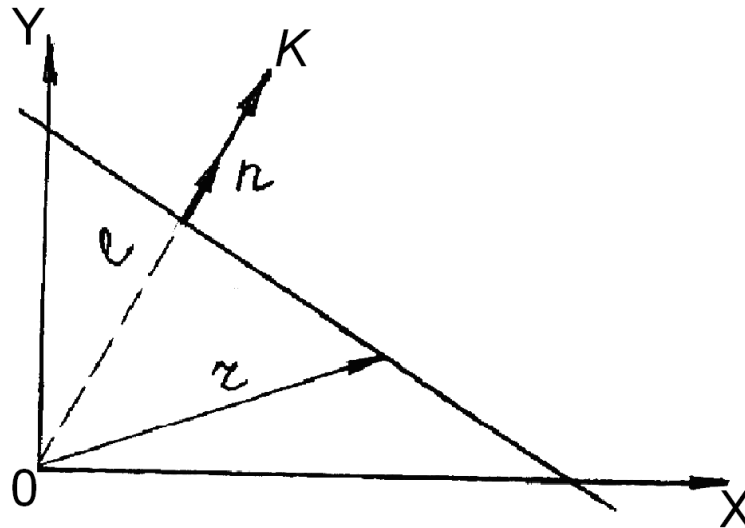


Рис.5.2. Распространение плоской волны в произвольном направлении

Рассмотрим сферические и цилиндрические волны. В однородной изотропной среде произвольная волна от точечного источника представляет собой сферически расходящееся возмущение вида:

$$\xi = 1/r f(t - r/v), \quad (5.7)$$

где r – расстояние от точечного источника.

В случае возбуждения монохроматических колебаний в источнике уравнение (5.5) принимает вид:

$$\xi = \frac{a_0}{r} \cos(\omega t - kr), \quad (5.8)$$

где a_0 – постоянная, a_0/r – амплитуда волны.

Волновые поверхности являются сферическими. В выражении (5.8) k – волновое число, а не волновой вектор K . С учетом поглощения среды в формулы (5.7), (5.8) добавляется множитель $e^{-\alpha r}$.

Другой важный вид симметричной волны – цилиндрическая, расходящаяся, например, от источников, равномерно расположенных вдоль оси в однородной среде.

На больших расстояниях R от источника ($R \gg \lambda$)

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{R}} f(t - R/v).$$

Для монохроматической волны:

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{R}} \cos(\omega t - kR).$$

Цилиндрическая волна, как и сферическая, должна содержать сгущения и разрежения.

В бесконечно упругой среде упругие волны могут существовать на любых частотах. В ограниченных структурах (стержнях, пластинах, оболочках) свободные упругие волны (т.е. при отсутствии внешнего возбуждения) возникают лишь на тех частотах, на которых удовлетворяются граничные условия. Эти частоты называются собственными (или резонансными) частотами свободных колебаний ограниченной структуры.

В задачах ультразвуковой дефектоскопии используются различные методы преобразования типов волн, чтобы наилучшим образом выявить дефекты разной ориентации относительно плоскости контроля.

Рассмотрим падение волны на границу раздела двух сред (рис.5.3).

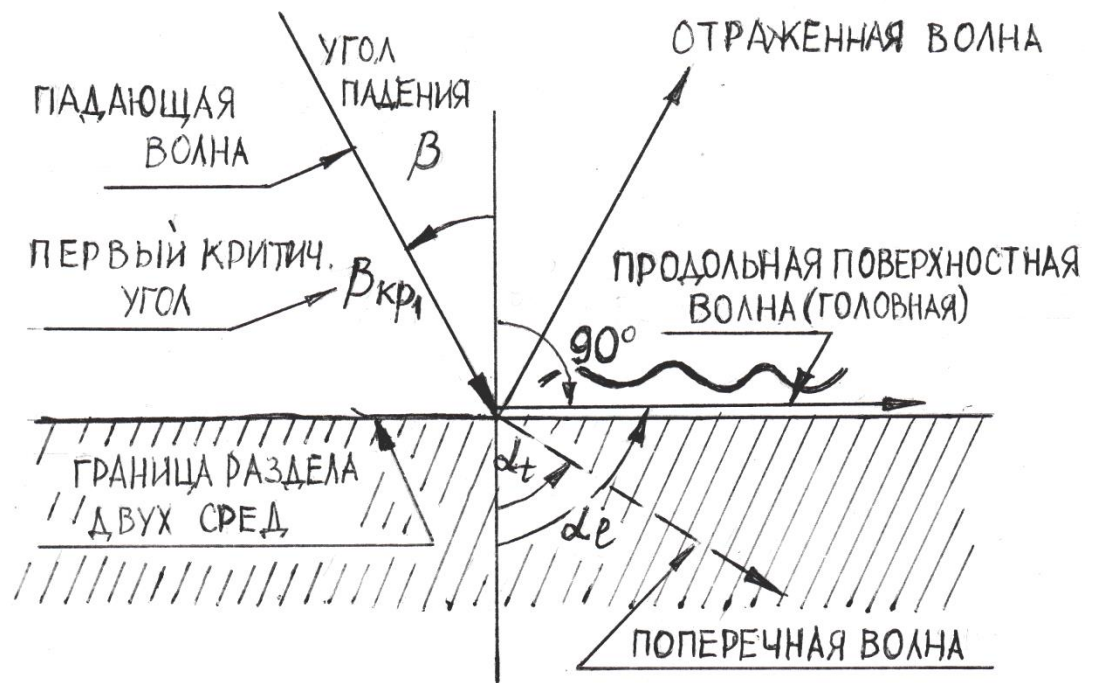


Рис. 5.3. Преобразование типов волн на границе раздела двух сред:

β – угол падения; α – угол преломления

Падающая волна частично отражается от поверхности раздела и частично преломляется, переходя во вторую среду.

Угол преломления находится из закона Снеллиуса:

$$\sin \alpha = c'/c \sin \beta,$$

где c' и c – соответственно скорости звука в нижней и в верхней средах относительно линии раздела.

Следует обратить внимание, что на линию раздела падает продольная волна, а в результате преломления возникают продольная и поперечная волны.

При увеличении угла падения может наступить такой момент, что угол преломления для продольной волны станет 90^0 и преломленная волна станет распространяться вдоль поверхности, то есть она превратится в головную волну. Этот угол падения называется первым критическим углом.

В этом случае в нижней среде останется только поперечная волна, которая широко используется в эхо-методе для выявления трещин и других дефектов, ориентированных более или менее вертикально относительно линии раздела двух сред.

Дальнейшее увеличение угла падения до второго критического приведет к появлению вдоль поверхности поперечной волны, то есть обе преломленные волны испытают полное внутреннее отражение. При этом поперечная волна превратится в поверхностную, так называемую «релеевскую» волну. Поверхностные волны используются для обнаружения поверхностных дефектов.

Ультразвуковая дефектоскопия

Акустический ультразвуковой эхо-импульсный вид НК

Акустический ультразвуковой эхо-импульсный метод НК основан на излучении в контролируемое изделие коротких импульсов упругих колебаний

(длительностью 0.5...10 мкс) и регистрации интенсивности (амплитуды) и времени прихода эхо-сигналов, отраженных от дефектов объекта контроля.

К достоинствам ультразвукового эхо-метода можно отнести:

- поиск дефектов внутри материала по всей толщине;
- поиск дефекта скрытых элементов конструкции;
- контроль широкого ассортимента материалов;
- контроль без демонтажа детали с объекта;
- контроль без нарушения лакокрасочного покрытия.

К отрицательным свойствам УЗ эхо-метода относятся:

- наличие неконтролируемой зоны (зоны Френеля);
- наличие геометрических мертвых зон;
- наличие мешающих факторов (сигналы отражения от болтов, уступов);
- уменьшение отраженного сигнала в зависимости от угла наклона плоскости дефекта.

К основным характеристикам эхо-импульсного метода относятся чувствительность, максимальная глубина прозвучивания, минимальная глубина («мертвая» зона), разрешающая способность, точность измерения расстояния, производительность контроля.

Под чувствительностью понимают минимальный размер дефекта, находящегося на максимальной глубине и четко регистрируемого прибором.

Порог чувствительности ограничивается двумя главными факторами: чувствительностью аппаратуры и уровнем помех, в значительной степени зависящим от структуры материала.

Разрешающая способность – минимальное расстояние между двумя одинаковыми дефектами, при котором они регистрируются отдельно.

Максимальная глубина прозвучивания в технических характеристиках прибора соответствует максимальной длительности развертки дефектоскопа.

«Мертвая» зона – минимальное расстояние от поверхности изделия до дефекта, на котором он четко выявляется, не сливаясь с зондирующим импульсом.

В авиации применяется в основном ультразвуковой эхо-метод для поиска трещин ультразвуковым дефектоскопом УД-2-12, который настраивают по рабочему или стандартному образцу, а для замера толщины элементов конструкции АТ при одностороннем подходе используются ультразвуковые толщинометры УТ-31МЦ, УТ-93П, Булат-1S.

В процессе ультразвукового контроля выявлялись такие характерные дефекты, как износ хрома монорельсов закрылков на Ту-154 и трещины:

- барабанов основных колес самолетов;
- стакана крепления оси передней опоры;
- фитинга заднего лонжерона крыла.

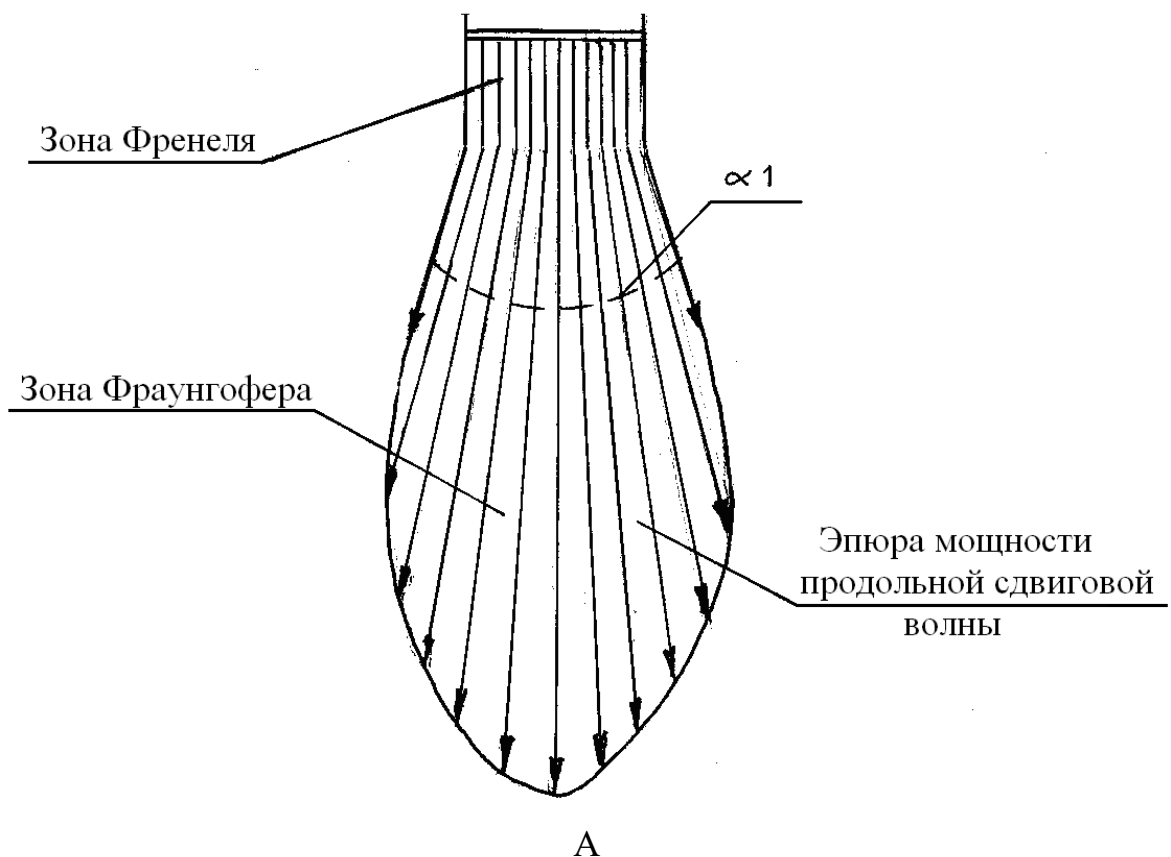
Регистрируемые НК акустические волны в элементах конструкции и системах АТ создаются принудительно ударным методом или излучателями (пьезоэлектрическими, магнитострикционными и динамическими, в которых используется энергия генераторов).

Количество энергии, переносимое волной за 1с сквозь сечение площадью в 1 квадратный метр перпендикулярно направлению распространения волны, называют интенсивностью. Интенсивность излучаемых волн, создаваемых в процессе вынужденных колебаний, имеет большое значение в акустической дефектоскопии.

При возбуждении в конструкции колебаний наибольшей интенсивностью обладают сдвиговые продольные волны, затем идут сдвиговые поперечные и, наконец, нормальные волны. Естественно, что скорости распространения этих волн разные. Максимальной скоростью распространения в одной и той же среде обладают продольно- сдвиговые волны. Меньшая скорость у поперечной сдвиговой волны и еще меньшая у нормальной волны. Скорость распространения акустических волн также зависит от плотности среды.

В процессе распространения акустических волн в средах происходит их затухание, увеличивающееся с повышением частоты колебаний и понижением плотности среды. Кроме того, при распространении акустических волн в реальных объектах они подчиняются законам геометрической оптики: преломлению, отражению, трансформации. К особенностям распространения УЗ волн относят наличие зоны Френеля, где волновое поле имеет цилиндрическую форму (ближняя зона), и зоны Фраунгофера, где волновое поле имеет форму усеченного конуса (дальняя зона) с углом α_1 (рис.5.4). Наличие зоны Френеля не позволяет контролировать материалы, толщина которых соизмерима с длиной волны УЗК.

Все эти свойства учитываются при неразрушающем контроле.



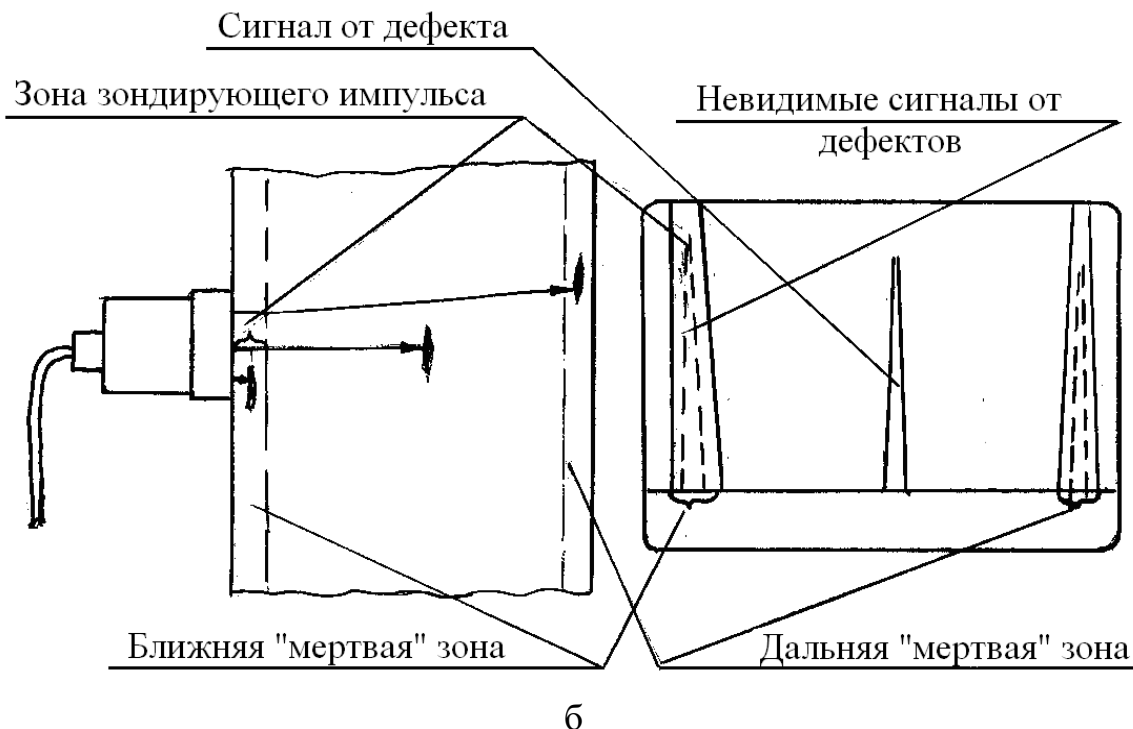


Рис.5.4. Ультразвуковой эхо-метод:

а – зоны Френеля и Фраунгофера; б – “мёртвые” зоны

Конструкция и эксплуатация средств ультразвукового контроля, применяемых в авиапредприятии

На рис.5.5 приведена принципиальная схема импульсного ультразвукового дефектоскопа типа УД2-12. Генератор радиоимпульсов 3 возбуждает пьезопластину передающей искательной головки 1. Ультразвуковые колебания распространяются в контролируемой детали, отражаются от ее противоположной стенки («донный сигнал») и попадают на пьезопластину приемной искательной головки 2. Отраженные ультразвуковые колебания возбуждают колебания пьезопластины приемной искательной головки 2. При этом на гранях пьезопластины возникает переменное напряжение, которое детектируется и усиливается в усилителе 4, а затем поступает на вертикальные отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) 5 осциллографа. Одновременно генератор горизонтальной развертки 6 подает пилообразное

напряжение на горизонтальные отклоняющие пластины ЭЛТ 5. Генератор радиоимпульсов 3 возбуждает пьезопластину передающей искательной головки.

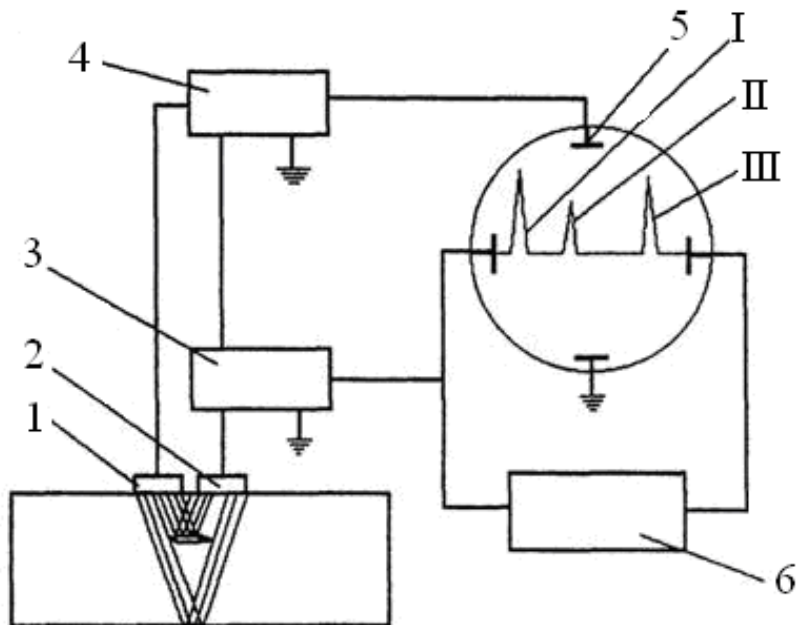
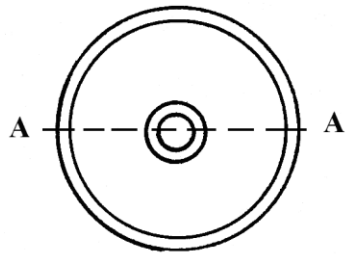
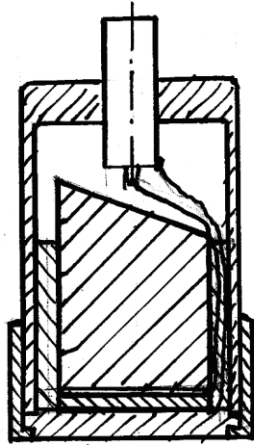


Рис.5.5. Блок - схема импульсного ультразвукового дефектоскопа:
 I – излучаемый радиоимпульс; II – импульс, отраженный от дефекта;
 III – донный импульс

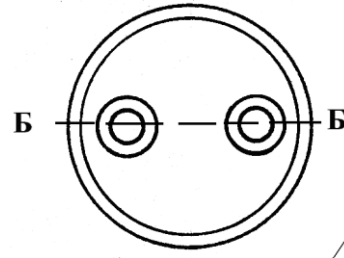
Регистрация акустических волн осуществляется искателями различного типа (рис. 5.6).



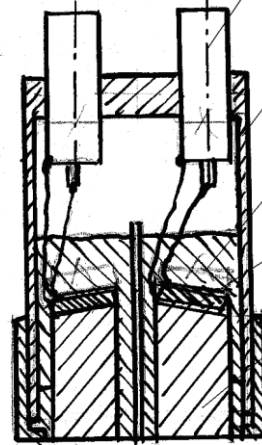
Сечение А-А



а



Сечение Б-Б



б

Разъем

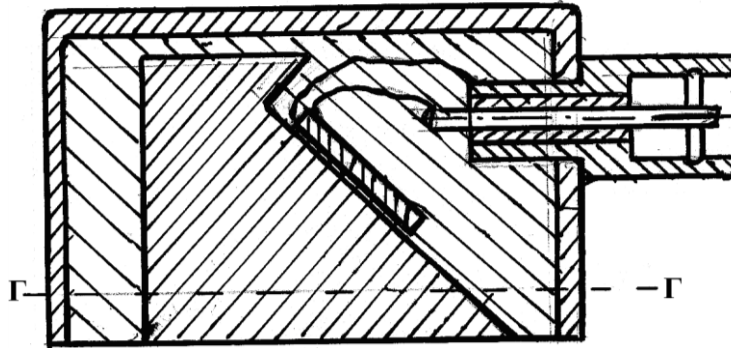
Корпус

Демпфер

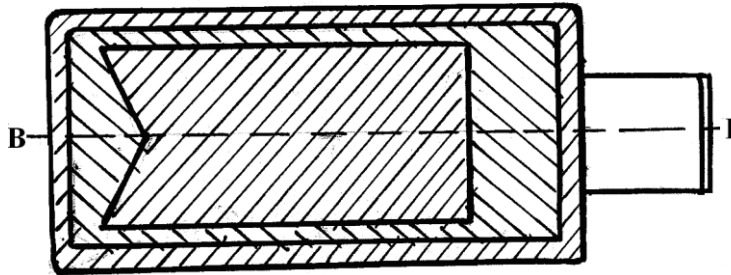
Пьезоэлемент

Призма

Сечение В - В



Сечение Г - Г



в

Рис.5.6. Варианты конструкции ультразвуковых преобразователей

В основном используются следующие пьезоэлектрические преобразователи: прямые совмещенные (рис. 5.6, а), отдельно совмещенные (рис. 5.6, б), наклонные совмещенные (рис. 5.6, в) или специально изготовленные по тем же схемам, но использующие разные способы акустического контакта (иммерсионные, катящиеся и другие).

В большинстве случаев излучение и регистрация акустических волн осуществляются перечисленными совмещенными прямыми и наклонными излучателями.

С помощью прямых и наклонных совмещенных, отдельно совмещенных и отдельных излучателей контролируют элементы конструкции под прямым углом к контролируемой поверхности и получают сдвиговые продольные, сдвиговые поперечные и нормальные акустические волны в материале.

В качестве использования эхо-импульсного метода рассмотрим схему определения координат и размеров дефекта (рис.5.7).

По результатам измерения времени пробега t_1 и t_2 поперечной волны от преобразователя и обратно до краев дефекта (r_1 и r_2) определяются координаты дефекта по следующим формулам.

Путь пробега волны:

$$r_1 = \frac{C_s t_1}{2}, \quad r_2 = \frac{C_s t_2}{2},$$

где C_s – скорость распространения поперечной волны в материале объекта контроля.

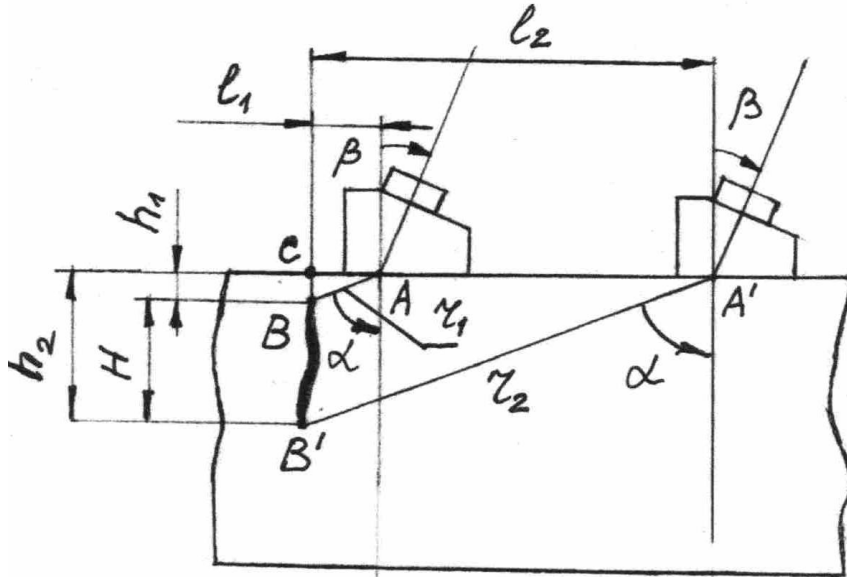
Угол наклона луча α определяется по закону Снеллиуса:

$$\frac{\sin \beta}{C_0} = \frac{\sin \alpha}{C_s},$$

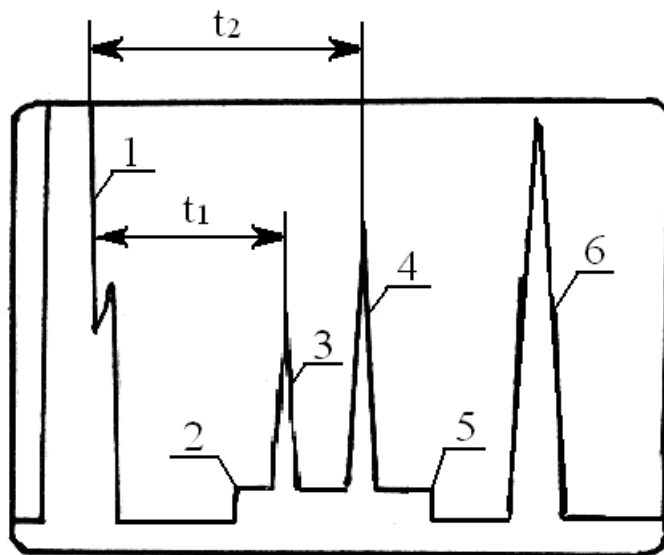
где C_0 – скорость продольной волны в материале призмы.

Отсюда $\sin \alpha = \frac{C_s \sin \beta}{C_0}$,

тогда $l_1 = r_1 \sin \alpha$, $l_2 = r_2 \sin \alpha$, $h_1 = \sqrt{r_1^2 - l_1^2}$, $h_2 = \sqrt{r_2^2 - l_2^2}$, $H = h_2 - h_1$.



а



б

Рис.5.7. Схема определения координат и размеров дефекта
эхо-импульсным методом:

а – положение преобразователя на объекте контроля в момент выявления дефекта; б – изображение на экране осциллографа;

r_1 и r_2 – путь луча от преобразователя и обратно при положении преобразователя в точке А и А'; l_1 и l_2 – расстояние преобразователя в двух положениях от плоскости дефекта по горизонтали; h_1 и h_2 – расстояние по вертикали от верхней и нижней «светящихся» точек до плоскости контроля; β – угол наклона преобразователя; α – угол ввода поперечной волны в объект контроля; 1 – зондирующий импульс; 2 – передний фронт стробирующего импульса; 3 – сигнал от дефекта при положении преобразователя в точке А; 4 – сигнал от преобразователя в точке А'; 5 – задний фронт стробирующего импульса; 6 – донный импульс

Кроме этого, применяются разновидности эхо-импульсных методов:

- эхо-зеркальный метод (рис.5.8, а), основан на анализе акустических импульсов, зеркально отраженных от донной поверхности дефекта, прошедших путь АВСД. Этот метод рассчитан на выявление вертикальных дефектов методом тандема. Для его реализации при перемещении преобразователей А и Д поддерживают постоянным значение $l_A + l_D = 2H \operatorname{tg} \alpha$, где H – толщина ОК. Для получение отражений от невертикальных дефектов значение $l_A + l_D$ варьируют. Эхо-зеркальный метод используется для выявления непроваров и дефектов в сварных швах, имеющих место на стыке с основным металлом;
- дельта-метод (рис.5.8, б), основан на использовании дифракции волн на дефекте. Часть падающей на дефект В поперечной волны от наклонного преобразователя рассеивается во все стороны от края дефекта, причем частично преобразуется в продольную волну. Часть этих волн принимается приемником продольных волн Д, расположенным над

дефектом, а часть отражается от донной поверхности и также поступает на приемник. Варианты этого метода предполагают перемещение приемника D по поверхности, изменяя типы излучаемых и принимаемых волн.

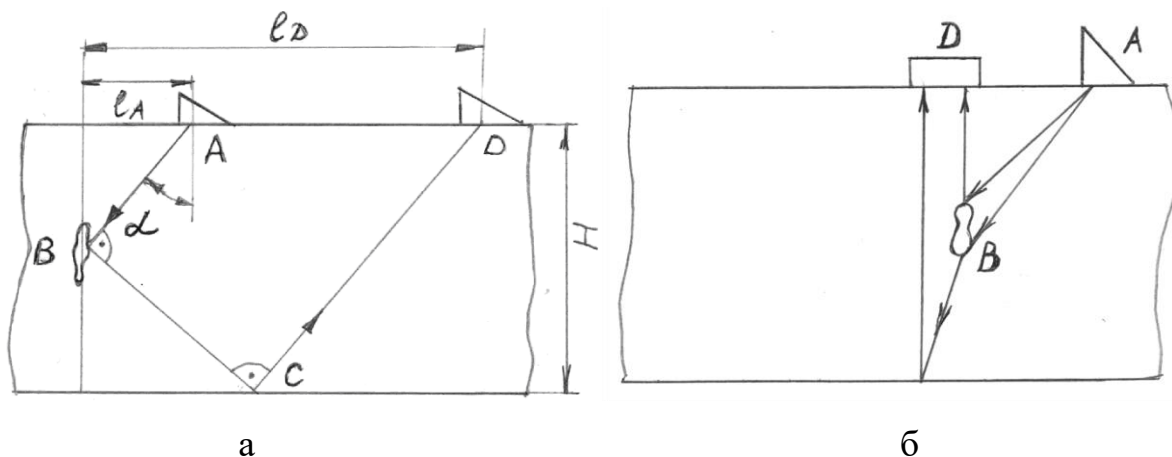


Рис.5.8. Эхо-зеркальный метод (а); дельта-метод (б):

A – преобразователь; D – приемник продольных волн; B – дифракция на дефекте

В случае контроля дефектов многослойных конструкций, в которых многократное отражение между слоями мешает использовать эхо-метод, применяются методы прохождения (теневой амплитудный метод и временной теневой). При этих методах излучающий и приемный преобразователи располагаются по разные стороны объекта контроля. Дефект определяется в первом случае по уменьшению амплитуды прошедшей волны (сквозного сигнала), а во втором случае – по времени запаздывания импульса, вызванного огибанием волной дефекта.

Вихретоковый метод НК

Вихретоковым (электромагнитным) НК называют вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации изменения взаимодействия собственного электромагнитного поля катушки искателя с электромагнитным

полем вихревых токов, наводимых этой катушкой в контролируемом объекте (ГОСТ-18353-73).

Полезную информацию о состоянии контролируемых металлических деталей несет в себе результирующее электромагнитное поле. Полученный сигнал зависит от наличия и расположения несплошности, увеличивающей траекторию вихревых токов, от удельной электропроводности, магнитной проницаемости, формы и взаимного расположения источника поля и контролируемого объекта, а также частоты испытательного тока.

На рис. 5.9 показана схема формирования поля вихревых токов в объекте контроля (ОК).

О наличии дефекта в ОК судят по изменению амплитуды и фазы тока в возбуждающей или измерительной катушках, а степень развития дефекта оценивается по величине комплексного (полного) сопротивления измерительной катушки.

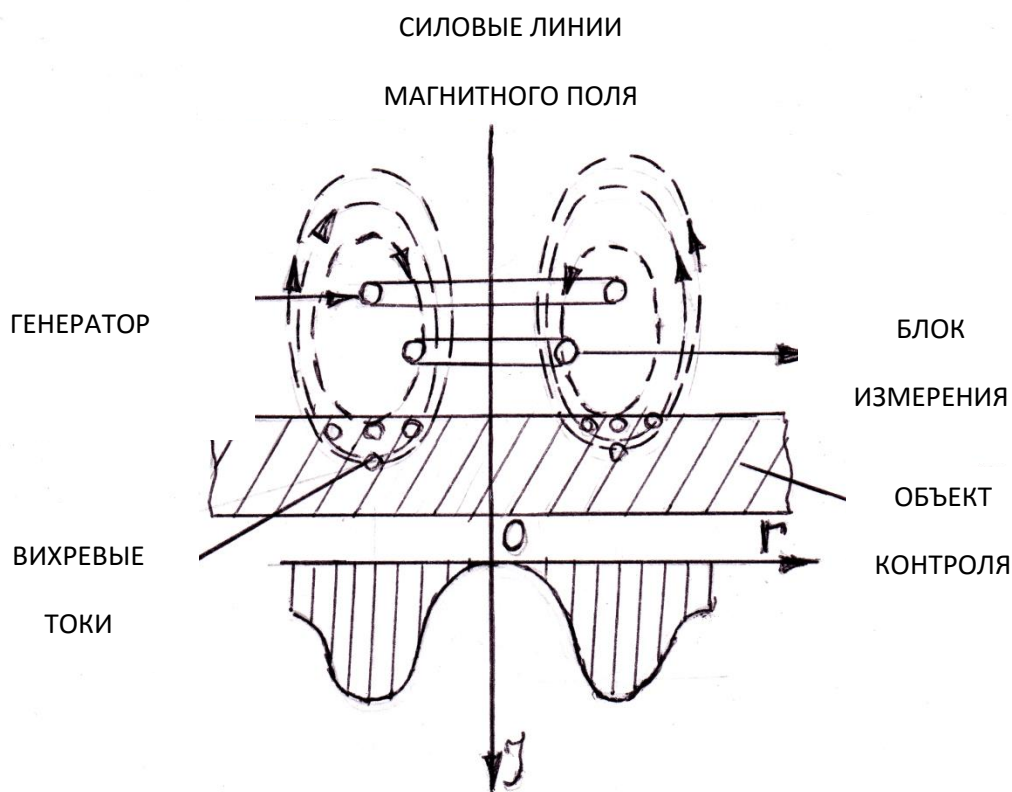


Рис.5.9. Схема формирования поля вихревых токов

По классификации вихретокового контроля (ВТК) применяются методы:

- переменного тока и переменного электромагнитного поля;
- индукционный – характер взаимодействия полей;
- амплитудно-фазовый – первичный информативный параметр.

Вихретоковый контроль широко применяется в АТ и занимает по количеству выполняемых проверок до 70% от всех выполняемых работ по НК, а выявляемость дефектов по отношению ко всем остальным видам контроля составляет 60%. Особенно необходимо отметить высокую чувствительность этого метода (выявляются трещины с раскрытием до 5 мкм) и возможность работы через лакокрасочные и неэлектропроводные покрытия толщиной до 1 мм.

К недостаткам ВТК относят невозможность контроля материалов на глубине более 0,25...5 мм (в зависимости от применяемой частоты).

Необходимые условия для выявления дефектов на объектах контроля при ВТК:

- шероховатость поверхности не должна превышать $Rz = 20$, мкм;
- стальные элементы не должны находится ближе 2 мм;
- скорость сканирования не должна превышать 3 м/мин.

Вихретоковым методом хорошо выявляются такие дефекты, как трещины, расслоения, разрывы, закаты, заковы, раковины, шлаковые включения и коррозия в пределах выявляющей способности дефектоскопов. Так, в 2000 г. на самолетах Ил-86 вихретоковым методом были обнаружены трещины обшивки фюзеляжа, трещина крышки передней опоры двигателя, трещины боковин барабанов колес КТ-171, трещины узла навески малой и большой створок.

Вихретоковый контроль применяется в основном для поиска и подтверждения трещин, несплошностей и коррозии на элементах конструкции

АТ из алюминиевых, магниевых, титановых и стальных сплавов, а также для измерения толщины материалов и покрытий.

В толщинометрии вихретоковый контроль позволяет измерять:

- толщину электропроводных материалов;
- толщину электропроводных покрытий на неэлектропроводных материалах;
- толщину неэлектропроводных покрытий на электропроводных материалах.

В структуроскопии с помощью вихретокового контроля можно оценивать:

- включения примесей;
- качество термообработки;
- изменения кристаллических характеристик электропроводных материалов.

Для вихретокового контроля АТ используются статические высокочастотные дефектоскопы ТВД, ТВД-А (рис. 5.10), «Проба-5», Д-5 с комплектами вихретоковых манипуляторов и датчиков типа «карандаш», «Г»-образный, «серп», проходные и др. (рис.5.11).

В качестве дополнительного оборудования при ВТК применяются специальные датчики и манипуляторы для доставки вихретоковых преобразователей в скрытые и труднодоступные места.

Для достоверного контроля занимаемого положения вихретокового преобразователя относительно контролируемой детали используют визуально оптические методы (эндоскопы Н-200 и ЭТЖ). Для фиксации и сканирования применяются специальные приспособления, лимбы и прокрутки. Для фиксации датчиков и эндоскопов в необходимых положениях используются специальные кронштейны, зажимы и трафареты.

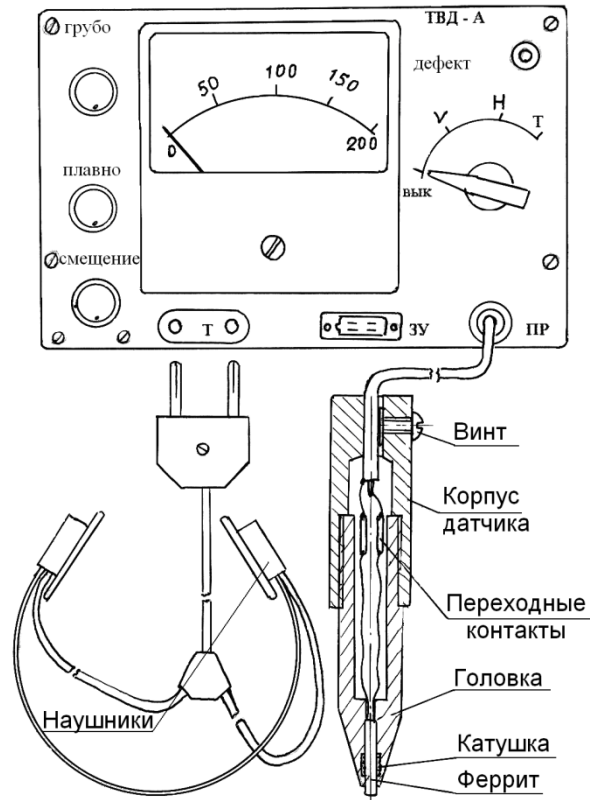


Рис.5.10. Вихретоковый дефектоскоп с датчиком типа «карандаш»

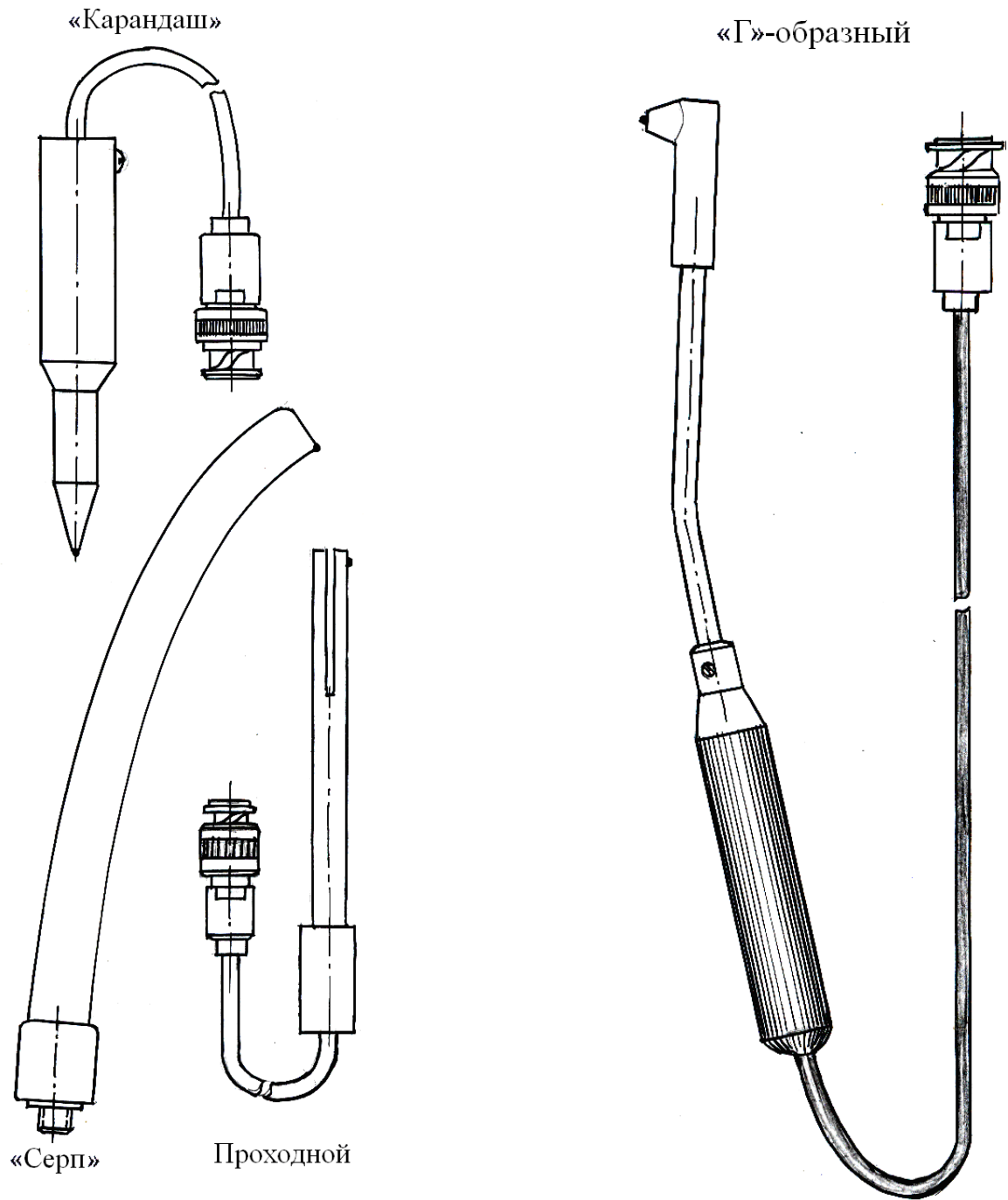


Рис.5.11. Типы вихрековых датчиков

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №5.

Магнитные методы НК. Визуально-оптический и капиллярный методы НК.

Магнитный вид НК. Последовательность операций при магнитном контроле. Достоинства и недостатки магнитных видов НК. Особенности и средства визуально-оптического контроля АТ. Цветной капиллярный контроль. Особенности люминесцентно-цветного капиллярного контроля. Характерные дефекты, обнаруженные капиллярным НК.

Магнитный вид НК.

Этот метод предназначен для регистрации магнитных полей рассеяния дефектов или магнитных свойств контролируемого объекта.

В процессе контроля АТ в основном применяются магнитоферрозондовый и магнитопорошковый методы НК.

Магнитоферрозондовый метод – это способ индикации первичной информации, основанный на измерении напряженности магнитного поля феррозондами (по нелинейности кривых перемагничивания сердечников из магнитомягких ферромагнетиков). Магнитоферрозондовый способ применяется для контроля степени размагниченности элементов конструкции при намагничивании элементов конструкции ВС атмосферным электричеством и после размагничивания при магнитопорошковом контроле. Для этих целей используется прибор измерения остаточного магнитного поля МФ-22Ф.

Магнитопорошковым методом НК называют способ индикации первичной информации, основанный на регистрации магнитных полей рассеяния дефектов с использованием в качестве индикатора ферромагнитного порошка или магнитной суспензии.

Магнитопорошковый метод НК используется для поиска поверхностных и подповерхностных (не глубже 1...2 мм) несплошностей (трещин) в магнитных материалах.

Физическая сущность метода заключается в том, что в намагниченной детали в местах расположения несплошности материала происходит перераспределение магнитного потока и выход части его на поверхность (рис. 6.1).

В зависимости от магнитных свойств материала (остаточной индукции) применяют способ намагничивания в приложенном магнитном поле и способ, основанный на остаточной индукции. Выбор осуществляется согласно ГОСТу 21105-75 исходя из свойств материала с чувствительностью «А» и «Б» (по требованиям документов гражданской авиации согласно графикам, приведенным на рис. 6.2 и 6.3). Правильное намагничивание и соблюдение всех требований технологий имеют решающее значение в магнитопорошковом контроле.

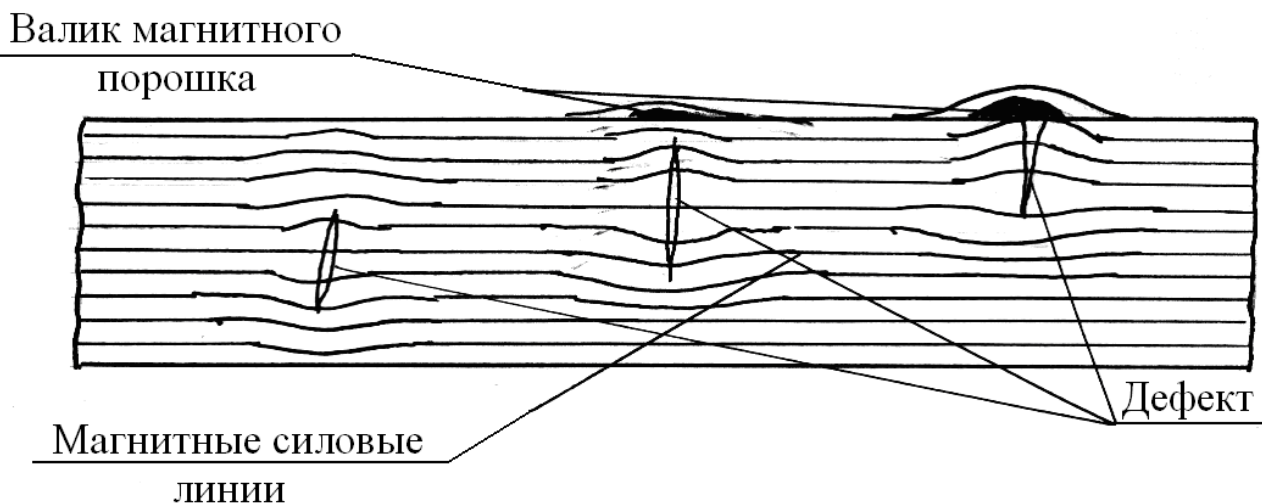


Рис.6.1. Распределение магнитной индукции
в местах несплошности материала

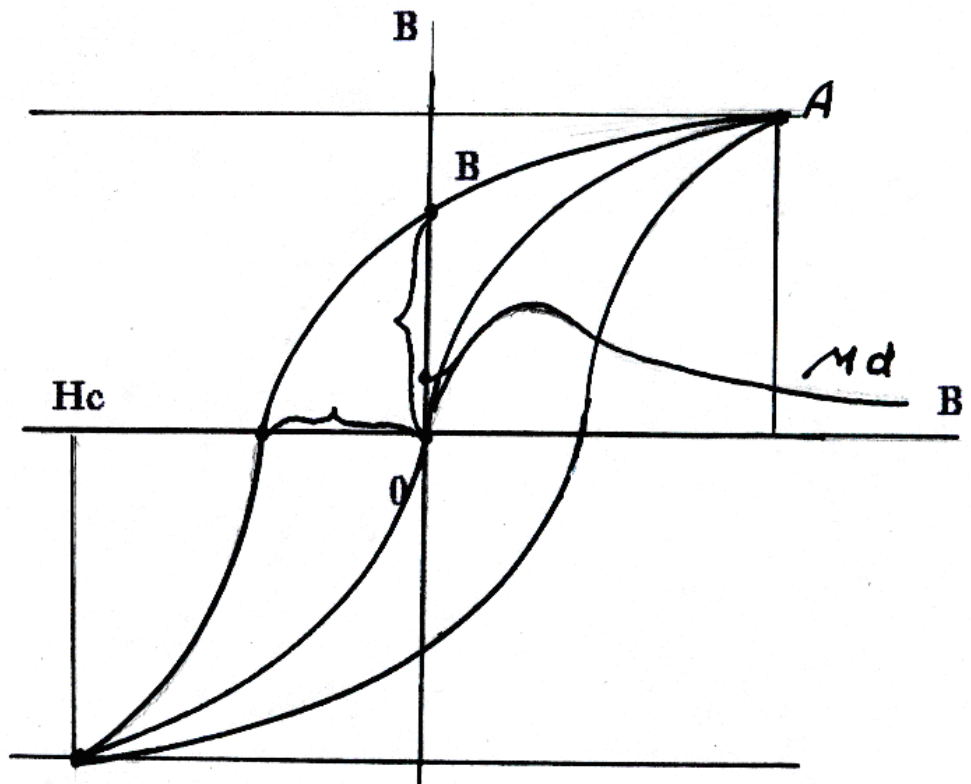


Рис.6.2. Кривая перемагничивания стали (петля гистерезиса)

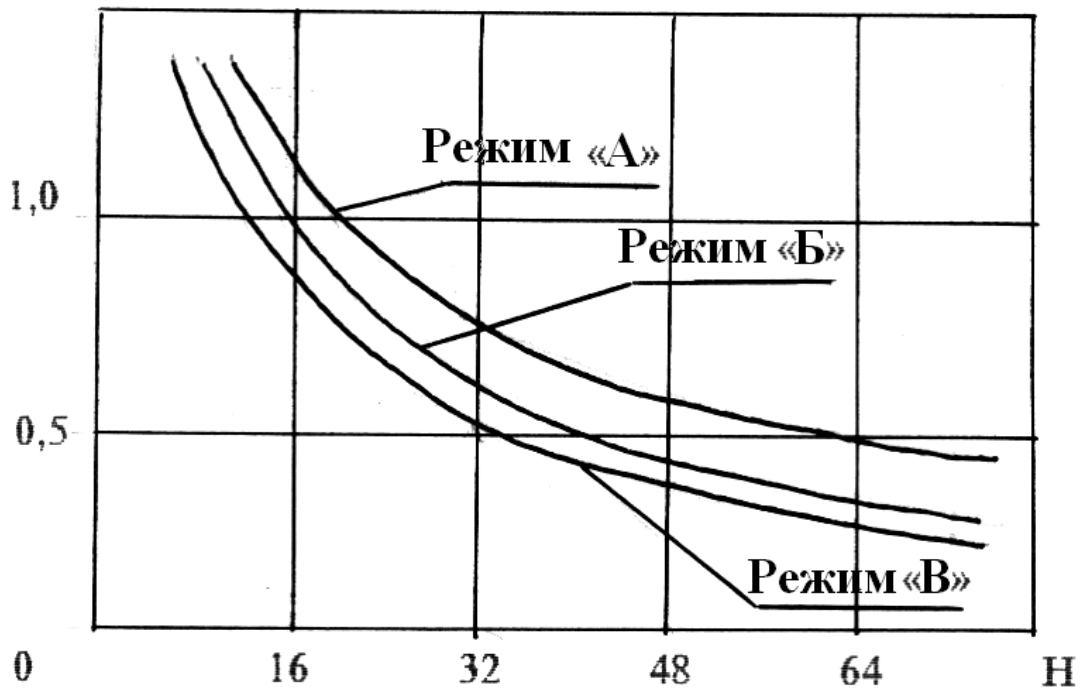


Рис.6.3. График определения возможности контроля

Магнитопорошковый метод нашел широкое применение в ГА для поиска поверхностных и подповерхностных (до 2 мм) несплошностей (трещин, рыхлот, раковин, коррозии и др.) на магнитных материалах и деталях (опор и осей шасси, болтов, подшипников, кронштейнов и др.).

Характерные дефекты, обнаруженные магнитопорошковым методом НК:

- трещины осей передних колес, трещины болтов и подшипников крепления стабилизирующего амортизатора тележки основных опор шасси (Ту-154Б);
- трещины опор в резьбовой части, трещины цилиндра передней опоры шасси, трещины болтов и подшипников цепочки механизма запрокидывания колес основной опоры шасси (Ту-134);
- трещины стяжных болтов боковин колес (Ил-86).

Для проведения магнитопорошкового контроля применяются следующие приборы и средства:

- намагничивающие устройства (дефектоскопы), в том числе стационарный дефектоскоп МДА-3, переносные ПМД-70 и МПД-1 со вспомогательными средствами и аппаратурой;
- измерители напряженности магнитного поля Ф-190, прибор измерения остаточного магнитного поля МФ-22Ф, микровеберметр Ф-191;
- зеркала, эндоскопы Н-200И и ОЛИМПАС.

Магнитопорошковый контроль включает следующие технологические операции:

- подготовку изделия к контролю;
- намагничивание изделия;
- нанесение на изделие магнитного порошка или суспензии;
- осмотр;
- анализ результатов осмотра и принятие решения о годности детали;

- размагничивание изделия.

Осмотр изделия при магнитопорошковом контроле производится визуальным или визуально-оптическим методом с некоторыми особенностями.

При осмотре необходимо применять меры против стирания индикаторных следов, меры противопожарной безопасности, меры против действий, образующих ложные дефекты (касание и проведение магнитными предметами по контролируемым поверхностям и др.).

Анализ результатов осмотра и принятие решения о годности детали при магнитопорошковом контроле производится согласно требованиям технологических карт. Высота и ширина получаемого индикаторного рисунка (валика) магнитного порошка примерно характеризуют глубину и характер несплошности и распределение магнитной индукции на детали.

После осмотра выполняют размагничивание изделия, необходимое для устранения влияния остаточного намагничивания на приборы ВС. Оно производится средствами, входящими в комплект используемых дефектоскопов. Физическая сущность размагничивания заключается в циклическом уменьшении магнитного потока в изделии с использованием законов магнитного гистерезиса.

Особенности и средства визуально-оптического контроля АТ.

Визуальный контроль (осмотр невооруженным глазом) – простейший и общедоступный вид НК, обеспечивающий высокую производительность контроля. Он особенно эффективен при контроле сравнительно больших объектов и широко применяется в эксплуатации ВС.

Так, визуальным методом были обнаружены трещины обшивки фюзеляжа Ил-86, непрочлей обшивки закрылков, трещины стяжных болтов боковин

колеса, износ болтов стабилизирующего амортизатора, дефекты воздухозаборника двигателя и кронштейна навески мотогондолы.

Все перечисленные дефекты были подтверждены инструментально (оптико-визуальным, вихретоковым и капиллярным методами).

Наилучшие результаты визуального метода контроля получаются при выборе оптимального расстояния до плоскости контроля и оптимальной освещенности зоны контроля. Разрешающая способность визуального метода контроля также зависит от угла направления освещения и от микронеровностей объекта. Для отработки методик контроля необходимо учитывать свойства глаза и параметры объекта контроля.

Оптический НК – это неразрушающий контроль, основанный на анализе взаимодействия оптического излучения с объектом контроля (ГОСТ 24521-80).

Оптические средства контроля по сравнению с визуальными методами дают возможность исследовать оптическим методом поверхности скрытых элементов конструкции и на достаточно больших расстояниях. Видео-телевизионная техника позволяет еще эффективнее работать, применяя программное обеспечение, архивирование и манипулирование изображением.

В процессе диагностирования состояния ГТД применяются жесткие, гибкие и видеоэндоскопы. На рис. 6.4 приведены различные конструкции эндоскопов.

Жесткий эндоскоп (рис. 6.4, а) предназначен для визуального контроля объектов, к которым возможен прямолинейный доступ. Он состоит из визуальной и осветительной системы. Визуальная система выполнена с использованием линзовой, стержневой или градиентной оптики, которая заключена во внутреннюю металлическую трубку. Осветительная система состоит из оптического волокна, которое расположено между двумя металлическими трубками: наружной и внутренней.

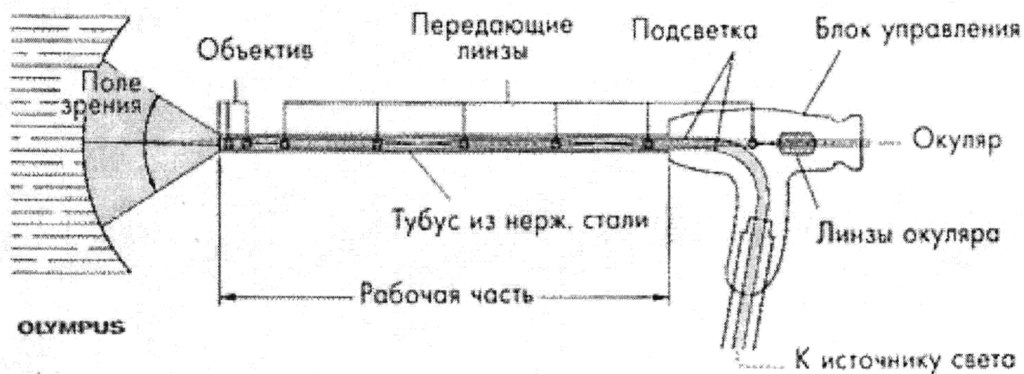
Жесткие эндоскопы используются для осмотра газоздушного тракта авиадвигателей и других полостей двигателей и механизмов. Например,

эндоскопами Н-200-ИМ-М замеряются зазоры в бандажных полках рабочих лопаток. Из-за отклонения величины зазора от требований техдокументации было досрочно снято два двигателя и не продлен гарантийный ресурс пяти двигателям.

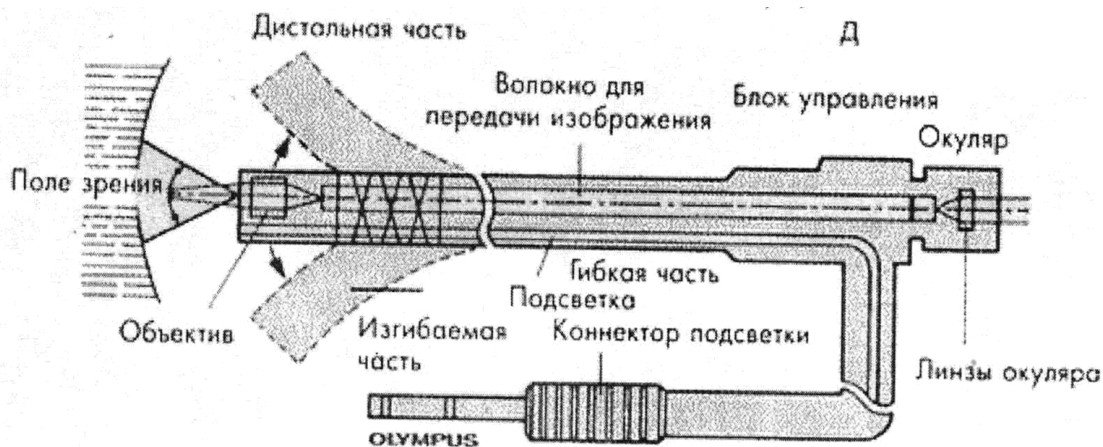
Когда прямой доступ к объекту невозможен по причине сложной геометрии (ГТД) применяют гибкие эндоскопы (рис. 6.4, б).

В гибких эндоскопах визуальная система и система передачи света состоят из волоконной оптики, смонтированной внутри гибкой трубки с управляемым дистальным концом.

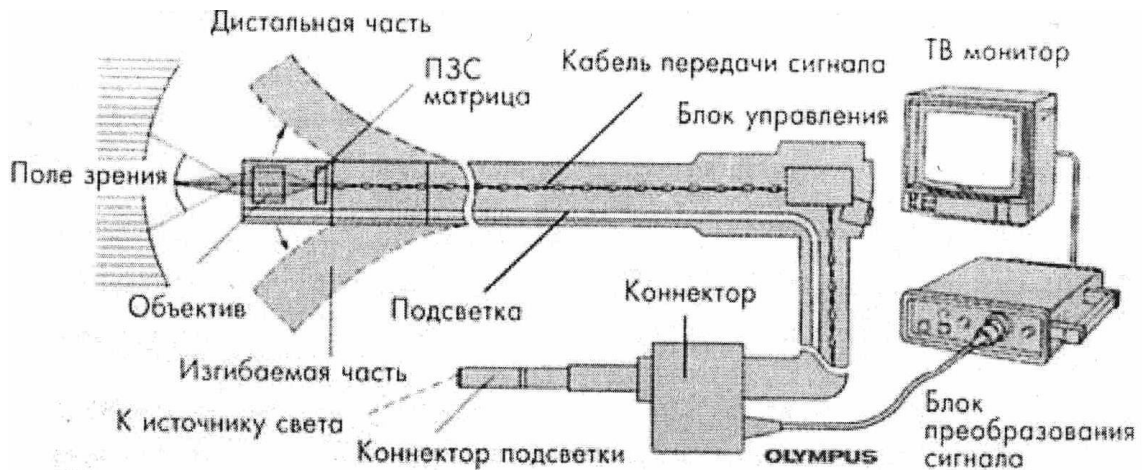
С помощью гибкого эндоскопа в двигателе ПС-90 был обнаружен отрыв лопатки 6-й ступени компрессора. Последующая разборка двигателя показала разрушение лопаток остальных ступеней двигателя.



а



б



В

Рис.6.4. Варианты конструкций эндоскопов:

а – жесткий; б – гибкий; в – видеоэндоскоп

Гибкие эндоскопы имеют ряд недостатков, наиболее существенные из которых – невысокая разрешающая способность и ограничение по длине.

Замена в системе передачи изображения гибкого эндоскопа волоконно-оптического жгута на электронику позволила повысить разрешающую способность и увеличить его длину и привела к появлению видеоэндоскопов (рис. 6.4, в). Изображение в них через объектив попадает на ПЗС матрицу (прибор с зарядовой связью), затем сигнал по кабелю передается в блок преобразования и выводится на монитор.

Капиллярный вид НК

Капиллярный неразрушающий контроль основан на капиллярном проникновении индикаторных жидкостей в полости поверхностных дефектов и регистрации индикаторного рисунка.

Капиллярный НК применяется для обнаружения несплошностей в исследуемом материале.

Характерные дефекты, обнаруженные на ВС, – это трещины лопаток компрессоров, элементов конструкции двигателей, корпусов компрессоров, гидроцилиндров, обшивок, лонжеронов, фитингов, колес и др.

Цветной (хроматический) метод основан на регистрации цветного контраста индикаторной жидкости или газа и фона поверхности контролируемого объекта.

Капиллярный контроль выполняется по технологиям, указанным в руководящей технической документации (РТЭ) самолетов и двигателей.

Последовательность операций по выполнению цветного капиллярного контроля:

- очистка проверяемой поверхности (удаление загрязнений и ЛКП, обезжиривание, удаление оксидных пленок, промывка, сушка);
- нанесение проникающей краски;
- нанесение проявителя пенетранта;
- выдержка для обеспечения процесса диффундирования, сушка;
- осмотр исследуемой поверхности;
- анализ индикаторного следа;
- принятие решения о годности детали.

В качестве очистителя используется смывка (или растворитель), затем бензин, в качестве проникающей краски – пенетрант типа «К», для удаления излишков проникающей краски – масло-керосиновая смесь. Проявителем пенетранта является белая проявляющаяся краска типа «М», сушка составляет 1...2 часа.

Последовательность операций люминесцентно-цветного капиллярного контроля (ЛЮМ - 4) имеет свои особенности:

- очистка проверяемой поверхности (удаление загрязнений и ЛКП, обезжиривание, удаление оксидных пленок, промывка, сушка);
- нанесение индикаторной жидкости ЛЖ-6А и выдержка ее не менее 2 мин;

- промывка;
- нанесение проявителя ПР-1 распылителем, толщина слоя 10 мкм;
- осмотр поверхности в ультрафиолетовых лучах через 20 мин после нанесения проявителя (тип облучателя КД-31Л);
- анализ индикаторного следа;
- принятие решения о годности детали.

Достоинствами люминесцентно-цветного контроля являются наглядность и непосредственность индикации дефекта, возможность проведения одновременного контроля всей поверхности детали, возможность проверки деталей, изготовленных почти из любых материалов. Часто этот метод применяется для поиска дефектов в изделиях с темным цветом (лопаток турбин, азотированных деталей) и контрольных образцах.

К недостаткам люминесцентно-цветного контроля можно отнести невозможность проверки материала внутри детали, довольно сложную технологию, необходимость выдержки температурных режимов.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №6.

Характеристика систем регистрации параметров и алгоритмов обработки полетной и наземной информации. Типовая структура и задачи лаборатории диагностики на авиапредприятии.

Термины по ГОСТ Р 55860-2013, ГОСТ 13699-80 и ГОСТ 19919-74, а также следующие термины с соответствующими определениями:

- автоматизированная обработка: Обработка кодовых значений параметров с целью получения их физических значений в функции времени с графическим или цифровым отображением.
- бланк экспресс-анализа: Документ, содержащий результаты экспресс-анализа в виде номеров событий, отклонений и нарушений заданных режимов, интервалов времени, в течение которых они имели место, и опознавательных данных.
- бортовое устройство регистрации: Изделие или совокупность изделий, входящих в состав бортового оборудования летательного аппарата и обеспечивающих измерение, преобразование и автоматическую регистрацию значений параметров.
- бортовой накопитель: Часть бортового устройства записи речи или регистрации параметров, содержащая сигналограмму.
- декодирование: Обработка информации с графическим или цифровым представлением кодовых значений параметров в относительных единицах.
- защищенный бортовой накопитель: Бортовой накопитель, обеспечивающий сохранение сигналограммы в случае летного происшествия.
- носитель записи: Физическое тело, используемое при записи для сохранения в нем или на его поверхности сигналов информации.

- экспресс-анализ: Логическая обработка кодовых значений параметров с целью обнаружения отказов бортового оборудования и силовых установок, а также отклонений от заданных режимов полета с выводом результатов на бланк экспресс-анализа.

сокращения:

БП - безопасность полетов;

ЕАСА - (EASA, European Aviation Safety Agency (Европейское агентство авиационной безопасности));

ЗБН - защищенный бортовой накопитель;

ИКАО - Международная организация гражданской авиации;

ИОСА (IOSA, IATA Operational Safety Audit, англ.) - программа производственного аудита безопасности авиакомпаний Международной ассоциации воздушного транспорта;

ОрВД - организация воздушного движения;

ПИ - полетная информация;

РУБП - Руководство по управлению безопасности полетов;

СМБ АД - система менеджмента безопасности авиационной деятельности;

СУБП - система управления безопасностью полетов;

ССПИ - средства сбора полетной информации;

FDR - flight data recorder (самописец полетных данных).

Общие требования к системам сбора, обработки и анализа полетной информации в гражданской авиации в соответствии с международными требованиями

1. Анализ существующих систем сбора полетной информации в гражданской авиации ЕС

Основу системы сбора ПИ составляет модуль FDR - бортовой регистратор ПИ, установленный на борту каждого ВС. Характеристики известных FDR, созданные разными фирмами-производителями, идентичны для ВС иностранного и отечественного производства. Это регламентировано в приложении 19 [1] и в Нормах промышленной безопасности Евроконтроля (действуют в странах ЕС).

1.1 Типовая (сертифицированная) наземная система обработки полетной информации аварийного регистратора SSFDR ("L3 Communication F1000") самолетов A 319 N VP-BTO, VP-BTQ, VP-BTS, VP-BTT

Модуль 1. Предварительный просмотр копии полета

Функции:

- готовности и признаки, используемые при предварительном просмотре копии полета;
- алгоритмы предварительного просмотра копии полета;
- определение дополнительных значений параметров для передачи в программу экспресс-анализа;
- паспортные данные.

Модуль 2. Экспресс-анализ полетной информации

Функции:

- готовности и признаки, используемые в алгоритмах экспресс-анализа;
- алгоритмы экспресс-анализа;
- профиль полета;
- эксплуатационные ограничения;
- выполнение полета;

- контроль аварийного состояния систем самолета. Предупреждения. Сообщения;
- мониторинг двигателей;
- формулы для вычисления констант и переменных, не регистрируемых бортовым регистратором.

Модуль 3. Перечень аналоговых параметров и разовых сигналов, регистрируемых эксплуатационным накопителем SSFDR на самолетах A319 VP-VTO, VP-VTQ, VP-VTS, VP-VTT

Функции:

- в FDR регистрируются два типа сигналов:
- аналоговые параметры;
- разовые команды.

1.2 Наземная система обработки полетной информации бортового регистратора самолета BOEING 737-500 NN EI-CDE, EI-CDD, EI-CDF, EI-CDG, EI-CDH

Модуль 1. Предварительный просмотр копии полета

Функции:

- готовности и признаки, используемые при предварительном просмотре копии полета;
- алгоритмы предварительного просмотра копии полета;
- определение дополнительных значений параметров для передачи в программу экспресс-анализа;
- паспортные данные.

Модуль 2. Экспресс-анализ полетной информации

Функции:

- готовности и признаки, используемые в алгоритмах экспресс-анализа;

- алгоритмы экспресс-анализа;
- профиль полета;
- эксплуатационные ограничения;
- выполнение полета;
- контроль сигналов опасного и аварийного состояния;
- мониторинг двигателей;
- формулы для вычисления констант и переменных, не регистрируемых бортовым регистратором.

Модуль 3. Перечень аналоговых параметров и разовых сигналов, регистрируемых на самолетах Boeing 737-500

Функции:

- в FDR регистрируются два типа сигналов:
- аналоговые параметры;
- разовые команды.

1.3 Наземная система обработки полетной информации аварийного регистратора DFDR ("Honeywell"), эксплуатационного регистратора oQAR ("Teledine") самолетов A 320-200 N EI-DZR, EI-DXY и аварийного регистратора DFDR ("Honeywell") самолета VQ-BBM с перечнем регистрируемых параметров, определяемым блоком FDIU p/n ED43A1 D5

Модуль 1. Предварительный просмотр копии полета

Функции:

- готовности и признаки, используемые при предварительном просмотре копии полета;
- алгоритмы предварительного просмотра копии полета;
- определение дополнительных значений параметров для передачи в программу экспресс-анализа;

- паспортные данные.

Модуль 2. Экспресс-анализ полетной информации

Функции:

- готовности и признаки, используемые в алгоритмах экспресс-анализа;
- алгоритмы экспресс-анализа;
- профиль полета;
- эксплуатационные ограничения;
- выполнение полета;
- контроль аварийного состояния систем самолета. Предупреждения.

Сообщения;

- мониторинг двигателей;
- формулы для вычисления констант и переменных, не регистрируемых бортовым регистратором.

Модуль 3. Перечень аналоговых параметров и разовых сигналов, регистрируемых на самолете А 320-200 EI-DZR, DXY, VQ-BBM (FDIU p/n ED43A1 D5)

Функции:

- в FDR регистрируются два типа сигналов:
- аналоговые параметры;
- разовые команды.

1.4 Функциональные свойства наземной системы обработки полетной информации аварийного (DFDR Honeywell) и эксплуатационного (o-QAR Teledyne) регистраторов самолета BOEING 767-300

Модуль 1. Предварительный просмотр копии полета

Функции:

- готовности и признаки, используемые при предварительном просмотре копии полета;
- алгоритмы предварительного просмотра копии полета;
- определение дополнительных значений параметров для передачи в программу экспресс-анализа;
- паспортные данные.

Модуль 2. Экспресс-анализ полетной информации

Функции:

- готовности и признаки, используемые в алгоритмах экспресс-анализа;
- алгоритмы экспресс-анализа;
- профиль полета;
- эксплуатационные ограничения;
- выполнение полета;
- контроль аварийного состояния систем самолета. Предупреждения.

Сообщения;

- мониторинг двигателей;
- регулярная информация;
- формулы для вычисления констант и переменных, не регистрируемых бортовым регистратором.

Модуль 3. Перечень аналоговых параметров и разовых сигналов, регистрируемых на самолете Boeing 767-300 (Data Frame 767-3a)

Функции:

- в FDR регистрируются два типа сигналов:
- аналоговые параметры;
- разовые команды.

2 Анализ существующих систем сбора полетной информации в гражданской авиации РФ

2.1 Существующие в ГА РФ системы сбора полетной информации, устанавливаемые на самолетах (вертолетах), обеспечивают сбор, накопление и обработку сигналов в соответствии с перечнями контролируемых параметров, в том числе непрерывно изменяющихся параметров и разовых команд для обязательной регистрации на ЗБН. Последнее необходимо для обеспечения минимально необходимой информации при расследовании летных происшествий.

2.2 Бортовое устройство регистрации и записи речи устанавливается на самолетах (вертолетах) для записи в полете переговоров членов экипажа между собой и с землей. В состав устройства должны входить: бортовая аппаратура для записи переговоров членов экипажа, автоматически включающая ЗБН; микрофоны с микрофонным усилителем; элементы индикации и автоматического включения и выключения аппаратуры.

2.3 Наземное устройство обработки параметрической информации должно обеспечивать автоматизированную обработку зарегистрированной в полете параметрической информации, полученных с бортовых накопителей.

2.4 В Перечнях непрерывно изменяющихся параметров и разовых команд, подлежащих регистрации на самолетах и вертолетах всех типов и назначения должны быть определены непрерывно изменяющиеся параметры, подлежащие регистрации ЗБН. Среди них:

- параметры, характеризующие движение самолета;
- параметры, характеризующие состояние системы управления;
- параметры, характеризующие состояние силовой установки;
- параметры, характеризующие состояние систем самолета;

- служебные параметры;
- разовые команды, подлежащие регистрации ЗБН на самолетах гражданской авиации с ГТД.
- непрерывно изменяющиеся параметры, подлежащие регистрации на вертолетах.

При необходимости дополнительно для регистрации ЗБН могут быть рекомендованы также другие параметры и разовые команды.

2.5 ССПИ в ГА РФ в СМБ АД должны соответствовать ГОСТ Р 55860-2013.

Перечень факторов для регистрации в полетной информации с учетом значимости влияния на уровень безопасности полетов (на основе стандартов ИКАО)

1 Тематическое группирование факторов из основных блоков полетной информации FDR

Раздел "Человеческий фактор" состоит из следующих подразделов:

- командно-руководящий состав (к данному подразделу отнесены факторы командно-руководящего состава предприятий и организаций ГА РФ);
- персонал по ОрВД;
- экипаж ВС (перечень факторов унифицирован для всех членов экипажа, при кодировании необходимо указать, к кому из членов экипажа относится данный фактор);
- персонал инженерно-авиационной службы;
- персонал авиаремонтного завода;
- персонал конструкторского бюро, завода-изготовителя АТ;
- персонал авиационной метеорологической станции гражданской;
- персонал базы эксплуатации радиотехнического обеспечения и связи;

- персонал аэродромной службы;
- персонал службы электросветотехнического обеспечения полетов;
- персонал службы спецтранспорта и аэродромной механизации;
- персонал службы организации перевозок;
- персонал службы горюче-смазочных материалов;
- персонал бюро авиационной информации;
- персонал метрологической службы;
- персонал режимно-охранного обеспечения полетов;
- персонал медико-санитарной службы;
- персонал других служб предприятий ГА;
- персонал заказчика;

- прочие лица сторонних организаций.

Раздел "Факторы руководящего состава служб" описывается факторами конкретных служб.

Внутри каждого подраздела факторы отнесены к одной из групп факторов, описывающих определенное направление в деятельности каждой службы (согласно третьего классификационного уровня факторов).

Раздел "Факторы техники" состоит из подразделов:

- ВС (перечень систем и подсистем ВС, составленный в соответствии с требованиями ГОСТ 18675);
- аэродромное оборудование (перечни электрического и светового оборудования, специальных машин и механизмов, визуальных средств), радиотехническое оборудование и связь (перечни устройств и оборудования

(функциональные), используемые при управлении воздушным движением, навигации, наземной и воздушной связи.

Раздел "Факторы среды" состоит из двух подразделов:

- активные воздействия внешней среды;
- внешние условия.

В подразделе "Активные воздействия" в двух группах факторов "Эколого-орнитологические условия" и "Опасные геофизические явления" объединены обстоятельства, процессы и явления, проявление которых активно (значительно) влияет на характеристики полета ВС.

Факторы подраздела "Внешние условия", объединенные в группах "Характеристика местности", "Метеорологические условия" и "Условия в аэропорту", позволяют описать специфические характеристики и условия, при которых возникло то или иное событие.

В каждой группе выделен фактор "Прочие факторы". При невозможности описать все выявленные факторы с использованием предложенного перечня указывают "Прочие факторы" с обязательным описанием сути явления в текстовом описании события. Выполнение данного правила позволяет совершенствовать перечень факторов.

2 Методы сбора полетной информации в гражданской авиации ЕС на основе стандартов Евроконтроля.

2.1 Методы сбора полетной информации в ГА ЕС регламентированы консультативным циркуляром, который:

- излагает концепцию СУБП для поставщиков авиационного обслуживания (в том числе для авиакомпаний, эксплуатантов аэротакси, летных служб корпоративной авиации и летных школ);

- содержит инструктивные указания по развитию СУБП для поставщиков авиационного обслуживания.

При этом, консультативный циркуляр не обязателен к исполнению и не является правилом. Разработка и внедрение СУБП осуществляется добровольно. Использование СУБП, при этом не отменяет обязательства соблюдать действующие правила или иные установленные требования.

2.2 Применимость консультативного циркуляра касается как сертифицированных, так и не имеющих сертификатов эксплуатантов, которые желают разрабатывать и внедрять СУБП. В настоящее время СУБП не обязательны для держателей сертификатов. Тем не менее требования консультативного циркуляра предъявляются в качестве стандартизованных требований к СУБП, которые разрабатывают все поставщики авиационного обслуживания.

2.3 Этапы процесса оценки рисков

Оценку рисков выполняют в качестве процесса разработки правил в целях документального утверждения рисков, представленных любыми незапланированными событиями и вызванными идентифицированными угрозами.

3 Методы сбора полетной информации в гражданской авиации РФ на основе стандартов и рекомендуемой практики ИКАО и европейских нормативно-правовых документов ИОСА (ЕАСА)

3.1 Описание развития событий, сопутствующие причины и факторы

Для статистических исследований при описании развития событий используют три основных понятия:

- классификация события;
- тип события;
- причины и факторы, обусловившие событие.

Классификация события - отнесение описываемого события к одному из перечисленных классов событий по тяжести наступивших последствий:

- авиационные происшествия (катастрофы, аварии);
- серьезные инциденты;
- инциденты;
- чрезвычайные происшествия;
- повреждения ВС на земле.

При описании событий важно указать все типы событий и последовательность их проявления. Следует помнить, что описание событий будет неполным, если не указать, на каком этапе эксплуатации ВС произошло конкретное событие.

Причиной события является сочетание нескольких факторов, последовательное или одновременное проявление которых приводит к особой ситуации (авиационному происшествию, инциденту, чрезвычайному происшествию или повреждению ВС на земле).

Не следует разделять факторы на основные и сопутствующие, так как такое разделение часто оказывается субъективным (см. Руководство по представлению

данных об авиационных происшествиях/инцидентах - Руководство ADREP, 2-е изд., 1987 Doc 9156-AN/900.

Структура факторов также построена с учетом рекомендаций ИКАО, согласно которым для описания причин события используют два уровня факторов: собственно факторы, тождественные по смыслу описательным факторам автоматизированной системы учета авиационных происшествий ADREP [8] и уточняющие характеристики факторов (пояснительные факторы системы ADREP [8]).

3.2 Методы обработки полетной информации в гражданской авиации ЕС

С помощью программы avSCAN. flight производят предварительную обработку копии ПИ, получение и печать графической информации, а также получение рабочей копии ПИ, для программы экспресс-анализа файла в формате*.csv.

Результаты обработки ПИ по программе экспресс-анализа сохраняют в специально организованной реляционной базе данных, что позволяет проводить ретроспективный анализ средств объективного контроля по каждому самолету и пилоту или другому оценочному критерию отдельно.

Результаты расшифровки фиксируются в базе данных "анализ полетной информации" и передаются в базу данных "инспекции безопасности полетов" авиакомпании.

3.3 Описание алгоритмов экспресс-анализа информации аварийного (DFDR Honeywell) и эксплуатационного (QAR Teledyne) регистраторов самолета BOEING 767-300

Определение дополнительных значений параметров для передачи в программу экспресс-анализа.

Модуль 1. Определение средних медианных значений параметров в последней контрольной выборке до взлета.

Модуль 2. Определение средних медианных значений параметров в контрольной выборке после посадки.

Функции:

- при наличии готовности ГТвп. 2 сформировать четыре 9-секундные выборки для параметров G, Hb, HDN, FLAP и SAT (параметры опрашивать один раз в секунду);

- упорядочить выборки по мере возрастания значений параметров;

- за средние медианные значения принять пятые значения параметров в соответствующих упорядоченных выборках;

- запомнить время начала формирования выборки (твп. 2) и средние медианные значения посадочной массы самолета (G_{пос}), барометрической высоты (Hb₁), магнитного курса (HDN₁), посадочного положения закрылков (FLAP₁) и температуры воздуха (SAT₁);

- если средние медианные значения параметров не укладываются в заданные пределы (см. Пвп. 2), сформированные контрольные выборки

аннулировать (признак Пвп. 2 не выставлять) и приступить к формированию следующих выборок.

Модуль 3. Определить и запомнить время начала и окончания рейса, а также время посадки (тр.н, тр.к, тпос).

3.4 Общие требования к FDR

3.4.1 Анализ характеристик современных бортовых регистраторов самолетов "Боинг" и "Эрбас" показал, что методология наземной обработки ПИ практически сохранилась в том же виде, в каком была принята и внедрена в 90-х годах прошлого столетия.

Главным является "экспресс-анализ" ПИ, проводимый в целях выявления наиболее опасных факторов, определяющих угрозы нормальному функционированию систем ВС в полете. Это необходимо, поскольку на основе современных СУБП приходится решать проблемы оценивания и снижения рисков авиапроисшествий, что ранее было невозможно из-за компьютерно-информационных проблем.

Однако границы блока "навигационно-летные параметры" существенно расширились благодаря применению современных типовых FDR.

Главным результатом внедрения на ВС современных FDR следует считать обеспечение возможности регистрации технических параметров, характеризующих надежность изделий с позиций отказоустойчивости, контролепригодности и пр.

3.4.2 Число регистрируемых в FDR параметров и процессов возросло до 2500-3000 единиц, что ранее (90-е годы) было невозможно. Это дает основание обеспечить большую достоверность обработки ПИ за счет применения более точных моделей процессов, основанных на разработках современных методов диагностирования.

3.4.3 Изучение характеристик копий ПИ реальных полетов и алгоритмов экспресс-анализа показало, что содержательность анализа существенно увеличилась, хотя алгоритмы остались теми же, что и 10-20 лет назад. Однако полнота базы данных и объем причин нарушения экипажами летных стандартов стали более достоверными.

Необходимо отметить, что на основе ПИ удалось создать базу данных для построения моделей опасностей в полете при переходах в ГА от традиционного (для 90-х годов) "реактивного" метода предупреждения АП "к упреждающему управлению" состояниями АТ на основе исчисления рисков АП с помощью структур типа СУБП - для авиакомпаний и поставщиков услуг.

3.4.4 Стандарты, процедуры и методы расшифровки ПИ в ГА РФ на основе магнитных систем регистрации параметров (МСРП) и ГА ЕС на основе FDR практически идентичны.

3.4.5 Для обоснованного выбора принципов и методов построения моделей и оперативного прогноза текущего состояния технических узлов ВС, включая турбину и компрессор газотурбинного двигателя, подшипники, топливные насосы, электросети, навигационные комплексы, системы TCAS и другие системы, необходимо получить доступ к более обширным фактическим базам данных, формируемым с помощью FDR. Полнота данных должна быть

расширена, чтобы строить такие характеристики, как "тренды", определяющие тенденции изменения состояния ВС.

*Структура подразделений технической диагностики авиационной
техники и производственно-техническая база
(в соответствии с ГОСТ Р 55255-2012)*

1. Для обеспечения установленного порядка организации и выполнения обязательного объема работ по контролю, диагностированию и прогнозированию состояния АТ в составе организаций (авиакомпаний) по ТОиР создаются специализированные подразделения - лаборатории, группы, участки технической диагностики авиационной техники (они могут входить в состав единого структурного подразделения, осуществляющего работы в области неразрушающего контроля).

2 Структура специализированного подразделения ТД АТ, организация его деятельности и производственная база в отраслевой системе технической диагностики АТ должны обеспечивать выполнение основных задач и функций, указанных в приложении В.

3 В целях обеспечения координации работ и исполнителей, проведения единой технической политики, крупномасштабных и целевых научных разработок, организационного и методического руководства службами диагностики организаций ГА ГосНИИ ГА выполняет функции Центра технической диагностики авиационной техники ГА.

4 Система технической диагностики допускает возможность организации территориальных (удаленных, региональных) специализированных центров технической диагностики по видам выполняемых работ по ТД или по типам ВС, деятельность которых регламентируется ФОИВ ГА и отвечает требованиям настоящего стандарта.

Применение технических средств и специального оборудования

К применению в отрасли допускаются средства:

- диагностирования, внесенные в Государственный реестр средств измерений и (или) в перечень ССИ, применяемых в ГА;
- серийные, прошедшие государственные испытания;
- малосерийные, прошедшие межведомственные (отраслевые) испытания;
- единичные и импортного производства после прохождения экспертизы и оформления решения на их допуск (внедрение) к эксплуатации в ГА России.

На эксплуатационных предприятиях применяются, как правило, универсальные (не связанные с определенными типами ВС и АД) средства диагностирования, которые предназначены для решения определенных специальных задач:

- измерения концентрации продуктов изнашивания в работающих маслах и спецжидкостях авиадвигателей ВС, трансмиссий и редукторов вертолетов;
- измерения и анализа виброхарактеристик двигателей и агрегатов;
- контроля внутренней негерметичности агрегатов гидравлических систем;
- контроля чистоты топливных фильтров;
- измерения и анализа параметров двигателей и других агрегатов АТ;
- эндоскопического визуально-оптического контроля газоздушного тракта АД;
- объективного (фото- и видеосъемка) документирования результатов контроля.

В технически обоснованных случаях конкретное изделие АТ должно быть обеспечено специализированными средствами диагностирования.

Применение (внедрение) в технологических процессах диагностирования АТ новых технических (инструментальных) средств диагностики, а также вспомогательных специализированных средств (рабочих стандартных образцов,

преобразователей и др.) допускается только после оценки (приемки) их эксплуатационных, метрологических и экономических характеристик, с участием ГосНИИ ГА, а в необходимых случаях - после прохождения государственных и (или) межведомственных и ведомственных (отраслевых) испытаний.

По результатам оценки (испытаний) ГосНИИ ГА как головная организация в области ТД АТ выдает заключение на применение в эксплуатации новых средств и рекомендует ФОИВ ГА России внедрение их в установленном в отрасли порядке.

Организации промышленности (разработчик или изготовитель) могут рекомендовать (поставлять) специализированные средства ТД после проверки ГосНИИ ГА их эффективности и эксплуатационных затрат применения (трудозатраты, периодичность контроля и т.д.).

Организация по ТОиР должна принимать необходимые меры для обеспечения технологических процессов, методов и способов работы по ТД АТ основным, вспомогательным и специальным оборудованием и поддержания его исправного состояния, своевременной метрологической аттестации, калибровки (поверки) и допуска квалифицированного персонала.

Если к моменту обязательного срока начала выполнения определенных операций (конкретных работ) по ТД АТ предприятие не укомплектовано необходимым оборудованием, допускается выполнение таких работ путем кооперации с другими аттестованными организациями на договорной (или иной) основе.

Производственные помещения

Производственные помещения, предназначенные для работы с диагностической аппаратурой, вычислительной техникой, персональными компьютерами, должны отвечать требованиям, предусмотренным в описаниях соответствующих средств, руководствах и инструкциях по их применению.

Для группы анализа масла должно быть выделено отдельное помещение, отвечающее требованиям, предусмотренным для применения специальной аппаратуры по анализу масла.

На рабочих местах не должны находиться посторонние предметы, не связанные с выполнением работы.

В составе подразделений ТД АТ должно быть предусмотрено наличие вспомогательных помещений для хранения оборудования, архивов, магнитных носителей информации и бытовых нужд.

Информационное обеспечение

Система информационного обеспечения процессов диагностирования (СИОД) создается для комплексного анализа всей диагностической информации и автоматизированного формирования запрограммированных рекомендаций по оптимизированным управляющим воздействиям на объекты контроля (диагностирования).

СИОД должна обеспечивать выполнение следующих функций:

а) сбор, накопление, хранение и комплексный анализ информации от бортовых и наземных источников информации о надежности приписного парка ВС и технического состояния конкретных объектов диагностирования и выработки ими ресурса;

б) передача пользователям и отображение информации;

в) ведение банков данных для отчетной документации;

г) накопление данных для автоматизированного обмена информацией между эксплуатацией, ремонтом и промышленностью, в частности, для ведения рекламационной работы.

СИОД комплексно использует следующие источники информации:

- а) справки о работе материальной части и формуляры или паспорта изделий, которые должны содержать сведения о наработке и номера изделий;
- б) бортжурналы и зафиксированные в ПДО замечания экипажа по отклонениям в показаниях приборов и субъективным ощущениям;
- в) журналы технического обслуживания;
- г) донесения об инциденте или авиационном происшествии;
- д) записи МСРП и других носителей автоматической регистрации параметров и результаты их обработки;
- е) результаты лабораторных анализов проб работающего масла, отобранных из АД, и жидкостей гидравлических систем на содержание продуктов изнашивания;
- ж) карточки учета отказов и неисправностей;
- и) сведения о выполнении бюллетеней, доработок, учета рекламаций, сведений о последнем ремонте, проведенных регулировочных работах;
- к) справки о градуировках и заменах элементов бортовой и наземной аппаратуры;
- л) результаты диагностирования снятых изделий и агрегатов, проведенного в лабораторных условиях;
- м) результаты исследований отказавших изделий, в том числе проведенных в других организациях.

СИОД должна функционировать в составе комплексной информационно-управляющей системы АТ.

Исходная информация должна содержать данные, необходимые для идентификации объекта диагностирования на момент выпуска с завода-изготовителя или ремонтного предприятия.

Текущая информация формируется в полете и на земле и должна содержать оперативные данные, необходимые после их обработки и анализа для выработки рекомендаций по управляющим воздействиям на объекты диагностирования.

Параметры работы АТ, используемые для целей диагностирования, должны расшифровываться средствами объективного контроля.

Учетная (отчетная) документация по оценке состояния АТ

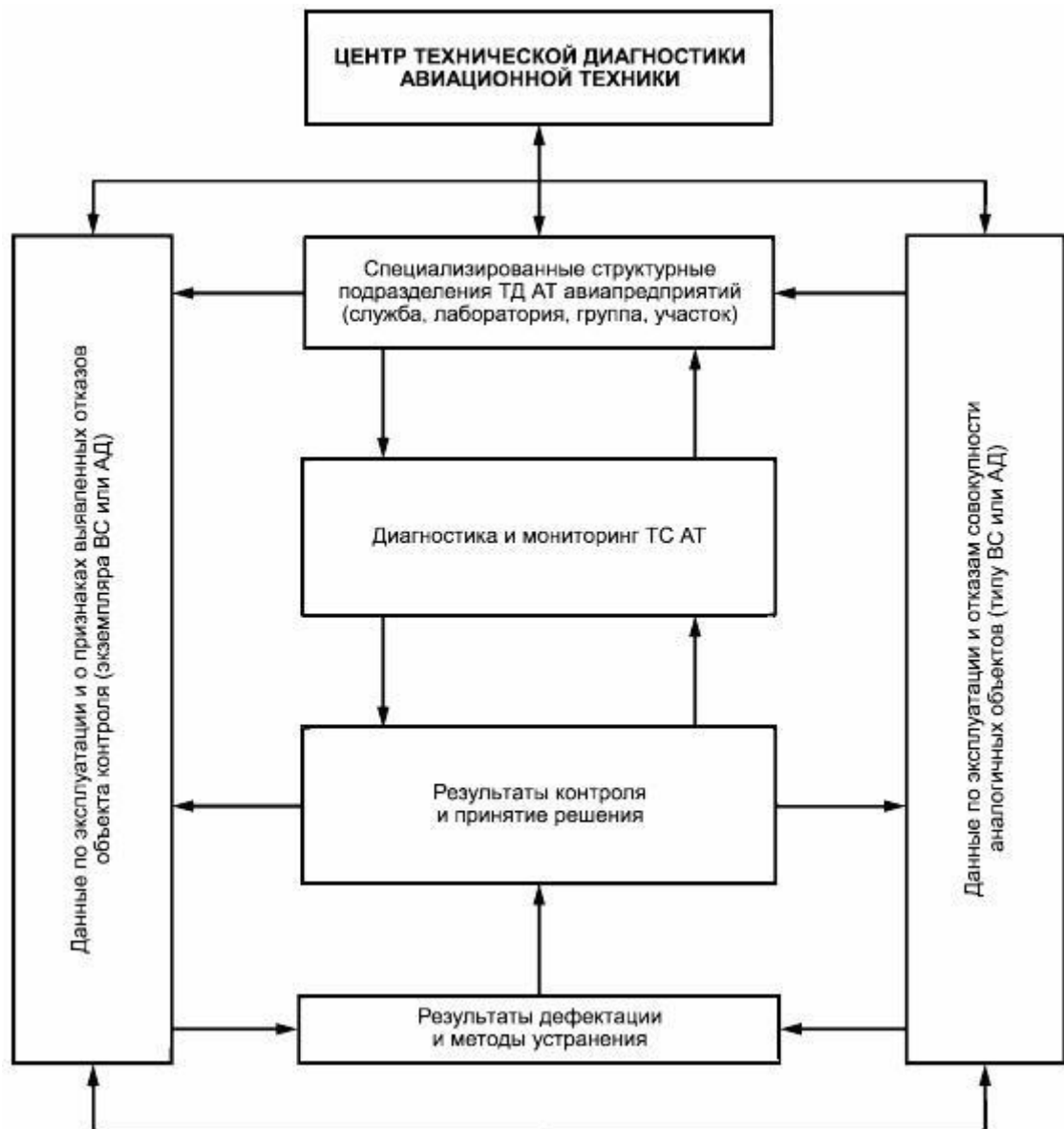
Отчетная документация по оценке ТС АТ должна включать в себя:

- а) дело воздушного судна;
- б) дело двигателя;
- в) материалы для формирования Паспорта вибрационного состояния двигателя;
- г) журнал результатов спектрального анализа масла;
- д) дело функциональной системы воздушного судна;
- е) журнал учета досрочно снятых двигателей;
- ж) журнал учета впервые выявленных, особо опасных отказов, а также отказов, приведших к инцидентам и авиационным происшествиям;
- и) журнал учета обнаруженных дефектов при ТД АТ и мероприятий, проведенных по их устранению;
- к) операционные карты технического обслуживания;
- л) материалы для формирования Паспорта коррозионного состояния самолета (вертолета).

Сведения, которые содержатся в отчетной документации, и формы документов должны соответствовать Положению о комплексной системе диагностирования авиационной техники.

Результаты эндоскопического контроля и обязательной объективной регистрации дефектов (фото- и видеосъемки) должны быть представлены в рамках единой отраслевой информационно-поисковой системы

Система технической диагностики на авиапредприятиях



ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №7.**Закономерности изменения технического состояния газотурбинных двигателей****1.1. Общий анализ дефектов и неисправностей авиационного ГТД**

В настоящее время разработку, изготовление и эксплуатацию ГТД осуществляют по следующему пути: эскизная разработка, проектирование, изготовление, испытания, анализ неисправностей, доработка. Это вызвано тем, что современный уровень науки и техники, организации производства и эксплуатации не обеспечивает бездефектность разработки, изготовления и эксплуатации двигателя. В общем случае все дефекты ГТД можно классифицировать следующим образом:

- 1) дефекты, возникающие по причине ошибок испытателя;
- 2) дефекты, возникающие в результате нарушения функционирования систем, обеспечивающих работоспособность двигателя;
- 3) дефекты, возникающие в связи с усталостной прочностью материалов, износом деталей, попадающими в двигатель посторонними предметами;
- 4) дефекты, связанные с выполнением регламентных работ:
 - а) посторонние предметы, оставленные в проточной части двигателя;
 - б) неточное установление деталей и агрегатов после замены;
 - в) разрегулирование и дефекты устанавливаемого оборудования.
- 5) дефекты, связанные с эксплуатацией двигателя:
 - а) небрежный предполетный осмотр силовой установки;
 - б) несоответствие выбранных режимов работы СУ и внешних условий;
 - в) превышение допустимого времени работы на максимальных режимах.
- 6) дефекты, связанные с нарушением функционирования систем:
 - а) неправильное ТО агрегатов, загрязнение топливо-гидравлической системы;
 - б) некондиционность рабочих жидкостей и газов;
 - в) дефекты, связанные с окислением штепсельных разъемов;
 - г) конструктивные недоработки.
- 7) дефекты, возникающие в результате изнашивания деталей:

- а) несовершенство технологии получения материалов;
- б) образование нагара на поверхностях трения;
- в) несоответствие нормам зазоров сопрягаемых деталей и перепадов температуры и давления;
- г) ухудшение процесса смазки деталей.

Вышеперечисленные дефекты ГТД могут привести к внезапным и постепенным отказам. Внезапные отказы сопровождаются аварийным изменением значений функциональных параметров, а также технического состояния узлов и агрегатов систем двигателя. Им сопутствуют ярко выраженные признаки нарушения нормальной работы двигателя:

- резкое изменение показаний контрольных приборов;
- посторонние шумы и вибрация;
- появление дыма и т.д.

На долю таких дефектов приходится в среднем до 30% от всех дефектов, приводящих к летному происшествию и до 14%-16% от всех дефектов, вызывающих досрочное снятие двигателя с эксплуатации. Постепенные отказы можно контролировать и, зная интенсивность их развития, предупредить момент наступления критического состояния.

1.2. Компрессор

При работе двигателя, на отдельные узлы и детали компрессора действуют различные по величине и направлению силы и моменты от них. Наибольшую нагрузку (растяжение рабочей лопатки вызывает центробежная сила, зависящая от массы лопатки, радиуса на котором расположен центр ее тяжести и частоты вращения ротора). Эти усилия достигают максимального значения в замковой части лопатки. На лопатки компрессора также действуют периодически изменяющиеся силы, вызывающие вынужденные колебания лопатки. Основными причинами периодичности действия сил является: парциальный подвод воздуха к рабочей лопатке из-за наличия спрямляющего аппарата, различный расход воздуха через отдельные каналы (неточное изготовление деталей и наличие стоек ротора). Наибольшая интенсивность колебаний лопатки наблюдается на нерасчетных режимах. Колебания (вибрация) лопатки вызывают значительные усталостные напряжения в них. Появление резонансных колебаний

резко увеличивает напряжения в лопатках, что может привести к их разрушению.

В процессе эксплуатации ГТД отмечается возможность появления следующих характерных неисправностей:

- повреждение лопаток посторонними предметами (обрыв лопатки);
- разрушение опор подшипников (заклинивание ротора);
- механический износ деталей проточной части компрессора;
- обледенение входной части двигателя и лопаток ВНА, что обуславливает уменьшение секундного расхода воздуха и вероятность механического повреждения рабочей лопатки кусочками льда;
- эрозионный износ лопатки, вызванный наличием пыли (морской соли) в воздушном тракте, приводит к уменьшению запаса прочности.

Значительный процент отказов двигателей связан с разрушением лопаток компрессора. Основными причинами разрушения лопаток у компрессора являются:

- высокий уровень динамического напряжения;
- недостаточная конструктивная прочность лопатки;
- эрозионный износ лопаток;
- повреждение лопаток посторонними предметами, попадающими в воздушный тракт;
- коррозионное повреждение поверхности лопатки;
- производственные дефекты.

Разрушение лопатки компрессора приводит к помпажу, повышению уровня вибраций и ухудшению характеристик двигателя. Высокие переменные напряжения, возникающие при резонансном колебании лопатки по основному тону (иногда по более высоким тонам), вызывает образование усталостных трещин. Усталостные разрушения происходят не мгновенно, что обуславливает постепенное накопление дефектов в кристаллической решетке и ограничивает скорость распространения трещин. При достаточной величине усталостных трещин происходит хрупкое мгновенное разрушение лопатки («долом»). В настоящее время инструментально определить уровень усталостного напряжения невозможно, поэтому лопатки заменяются, как только обнаруживается усталостная трещина. Развитие трещин начинаются, чаще всего, с выходных кромок, реже - с входных. Иногда они возникают на спинке и корыте лопатки у комлевой части, ближе к замку. При разрушении алюминиевых лопаток компрессора на лопатках турбины образуется налет

расплавленного металла в виде светлых пятен, что является признаком повреждения при оценке технического состояния. На двигателе, где имеет место усталостное разрушение лопатки, обычно наблюдается существенный разброс напряжений при резонансных колебаниях лопаток:

$$\frac{\sigma_{p_{\max}}}{\sigma_{p_{\min}}} = 3.5 \dots 4.5, \quad (1.1)$$

на исправных лопатка:

$$\frac{\sigma_{p_{\max}}}{\sigma_{p_{\min}}} < 1.5. \quad (1.2)$$

Поэтому отношение $\sigma_{p_{\max}} / \sigma_{p_{\min}}$, рассматривается наряду с максимальным напряжением $\sigma_{p_{\max}}$ как диагностический параметр.

Оценка напряжений производится с помощью тензодатчиков или путем бесконтактных измерений:

- дискретно-фазовый метод;
- голографический метод.

Эрозионный износ лопаток приводит к уменьшению их хорды и толщины, к снижению усталостной прочности, а также к снижению КПД компрессора и ухудшению других основных характеристик двигателя. Повреждение и износ лабиринтных уплотнений увеличивает осевой зазор, что снижает КПД и запас устойчивости компрессора. Наибольшим повреждением при эрозии подвергаются входная и выходная кромки, верхняя часть лопаток ротора и статора. При попадании в воздушный тракт посторонних предметов особенно сильно повреждается передняя кромка. Забоины, образующие при этом, могут служить центром зарождения усталостных трещин. Коррозионному износу подвержены, в основном, стальные и алюминиевые лопатки. Глубина коррозионного поражения достигает 0,2...0,4 мм и носит, чаще всего, межкристаллитный очаговый характер. Развитию повреждений способствуют прижоги и растягивающие напряжения в поверхностных слоях. Коррозионные повреждения уменьшают предел выносливости на 10...30%. Разрушению лопаток компрессора при эксплуатации способствуют производственные дефекты. Наиболее трудно дефектируются

прижоги поверхности и поверхностные растягивающие остаточные напряжения, возникающие при механической обработке. Нарушение геометрии профиля около кромок, отсутствие радиусов и галтелей и низкое качество поверхности снижает предел выносливости более, чем на 20%. Разрушение замков лопаток компрессора носит, в основном, усталостный характер. Этому способствует фреттинг-коррозия (коррозия трения), разрушающая поверхностные слои металла в местах контакта.

В процессе эксплуатации двигателя компрессор работает в различных режимах и атмосферных условиях, не соответствующих расчетным. Проходное сечение, подобранное для расчетного режима, в этом случае не соответствует новым значениям параметров воздушного потока, что обуславливает возникновение срывов и завихрений.

Помпажом называется неустойчивая работа компрессора и всего двигателя, возникающая при периодическом срыве воздушного потока с рабочих лопаток и спрямляющего аппарата. Помпаж является одной из наиболее распространенных причин, приводящих к отказу двигателя.

Основными причинами возникновения помпажа являются: резкое увеличение подачи топлива в камеру сгорания (рост температуры газа перед турбиной T_G^* , уменьшение абсолютной скорости воздуха по ступеням компрессора и секундного расхода воздуха через него G_B);

- 2) боковой ветер со скоростью выше допустимой (снижение G_B);
- 3) неисправности в системе управления перепуском воздуха в компрессоре или поворотом лопаток входного направляющего аппарата (ВНА) и спрямляющего аппарата (СА);
- 4) попадание в газоздушный тракт посторонних предметов (облом лопаток, заклинивание ротора, резкое снижение G_B);
- 5) работа двигателя на нерасчетных режимах;
- 6) повышенный износ лопаток (нарушение аэродинамики обтекания);
- 7) повышенный уровень турбулентности потока на входе в двигатель.

При наступлении помпажа происходят следующие явления:

- возникают колебания давления, скорости и расхода воздуха в газоздушном тракте;

- возникают колебания температуры газа перед турбиной вследствие импульсивного поступления воздуха в КС;
- уменьшается частота вращения ротора, что приводит к уменьшению G_B и степени повышения давления в компрессоре Π_K^* ;
- самовыключение двигателя из-за нарушения устойчивости горения.

Последствия возникновения помпажа:

- 1) обгорание или разрушение лопаток турбины из-за повышения T_G^* и возникновения пульсаций воздушного потока;
- 2) разрушение лопаток компрессора из-за колебаний параметров воздушного потока с большой амплитудой;
- 3) разрушение элементов конструкции двигателя из-за повышенных вибраций.

Меры борьбы с помпажом:

- 1) плавное изменение числа оборотов ротора турбокомпрессорной группы;
- 2) перепуск части воздуха с первых ступеней компрессора в атмосферу или в последующие ступени;
- 3) запуск двигателя с наветренной стороны;
- 4) установка систем непрерывного автоматизированного контроля за изменением T_G^* и частоты вращения турбокомпрессора;
- 5) изменение углов установки лопаток ВНА и СА первых ступеней;
- 6) перфорация корпуса компрессора над рабочими лопатками первых ступеней;
- 7) установка на двигатель мощного стартера с автономным переключением питания с 24 V на 48 V (при запуске).

Известно, что помпаж двигателя определяется, в первую очередь, внезапным падением давления P , возникающим за компрессором и увеличением температуры газов перед турбиной.

Характерные дефекты дисков компрессоров и турбин

Основными причинами разрушения дисков являются:

- низкое качество поковки и механической обработки;
- наличие посторонних включений в материале;
- коррозия поверхности;
- неправильная сборка и несовершенство контроля изготовления;

- эксплуатационные факторы.

По данным бюро безопасности национального транспорта США (NTSB USA), 15% разрушений приходится на вентилятор, 47% - на компрессор и 38% - на турбину, причем, 58% - на набор высоты, 25% - на взлет и посадку, 15% - на крейсерский режим. Разрушение дисков вызывает на самолете пожар (30%), повреждение топливной системы (15%), крыльев (40%) и кабины (15%). Из этого видно, что разрушение дисков является одним из наиболее опасных отказов двигателя. Сложный профиль дисков, отверстия в полотне и металлургические дефекты, создающие зоны концентрации напряжений, являются очагами усталостного разрушения. Способствующими факторами являются также риски от механической обработки и поверхностные остаточные растягивающие напряжения. Разрушение дисков может быть вызвано перегревом полотна диска в целом, местным перегревом отдельных его элементов или кратковременной статической перегрузкой, в следствии самопроизвольного возрастания оборотов ротора. Перегрев центральной, наиболее напряженной части диска, приводит к повышенной вытяжке. Этому способствуют высокий уровень статического напряжения от действия центробежных сил и пониженный уровень механических свойств материала.

Определение истинных причин разрушения дисков сводится к решению следующих задач:

- 1) определение числа оборотов в момент разрушения;
- 2) определение поля температур, вызвавших пластическую деформацию диска;
- 3) определение типа напряженного состояния поверхностного слоя после изготовления (наклеп, растягивающие остаточные напряжения и т.д.);
- 4) определение величины пластической деформации;
- 5) проверочный расчет на прочность по фактическим размерам и механическим свойствам материала.

От действующего термического напряжения при многократных повторях цикла «запуск - остановка» на ободной части диска могут возникать термические трещины, этому способствует наклеп от механической обработки и газовая коррозия по границам зерен.

В замковом соединении лопасти и диска возможно появление усталостных трещин при неравномерном распределении усилий по зубьям «елочного» соединения. В замках также возможно появление

фреттинг-коррозии, которая способствует возникновению усталостных трещин.

Диски осевых компрессоров

В зависимости от температуры диски выполняются из титановых сплавов (BT8, BT9, BT25У) или жаропрочных сталей (13Х12Н2В2МФ) и сплавов (ХН73МБТЮ, ХН62БМКТЮ).

Дефекты дисков:

1. Усталостные трещины на лабиринтах выполненных заодно с диском и имеющих консольное расположение.

В процессе доводки и эксплуатации возможны случаи появления трещин на гребешках лабиринта диска после различной наработки. Дефекты появляются и в условиях обеспечения гарантийного зазора между гребешками роторной части лабиринта и гладкой частью статора во всем диапазоне частот вращения.

2. Газонасыщенные участки в штамповках титановых сплавов.

Наличие газонасыщенных участков - весьма опасный дефект. Если дефектный участок не выходит на поверхность, то его трудно обнаружить существующими методами контроля и от него может развиваться усталостная трещина.

При развитии трещины появляются повышенный дисбаланс и вибрации двигателя, что является признаком неисправности.

Меры предупреждения и обнаружения подобных дефектов: отработка технологии производства штамповок дисков, исключаящее появление газонасыщенных участков, усовершенствование методов ультразвукового контроля, периодический контроль дисков в эксплуатации, специальная методика диагностирования вибрационного состояния, систематическое наблюдение за динамикой уровня вибрации по автоматизированной регистрации.

3. Объемные остаточные напряжения, наведенные на стадии изготовления заготовки, повышенная хрупкость материала диска вследствие превышения допустимого содержания алюминия.

Данный дефект является причиной разрушения диска компрессора из титанового сплава после наработки более 1000 часов и 5000 циклов от малоциклового усталости.

Опасность данного дефекта состоит в том, что он не может быть выявлен при стандартных испытаниях, а, следовательно, газотурбинная установка может выйти из строя внезапно, через достаточно длительный период времени.

Указанный дефект может быть выявлен только при малоцикловых испытаниях материала с выдержкой под нагрузкой.

4. Трещина усталостного характера от отверстий под препарирование.

На внутренней части полотна диска компрессора (под соединительными проставками) возможны трещины от отверстий выполненных под препарирование для тензометрирования в местах приварки фольги

Трещина имеет усталостный характер, очаг усталости на месте контактной сварки. Для исключения дефекта осуществляют скругление и полирование кромок отверстия и последующее упрочнение. Контактную приварку фольги исключают из технологии препарирования.

Ресурс дисков определяется малоцикловой и высокочастотной усталостью, а для горячих дисков последних ступеней компрессоров некоторое влияние на ресурс может оказать их длительная прочность. С учетом этого выбирают методы упрочнения дисков.

Замки крепления лопаток компрессоров

Для крепления рабочих лопаток компрессора к диску обычно применяют замки: *ласточкин хвост, шарнирные или елочные*.

Замки воспринимают статические нагрузки от центробежных и газовых сил, действующих на лопатки, и поперечные нагрузки от лопаток. На замки действуют также собственные центробежные силы.

Замок ласточкин хвост

Замок ласточкин хвост наиболее простой, технологичный и легкий.

В замке ласточкин хвост обычно оцениваются напряжения растяжения σ_R и изгиба σ_I в межпазовом выступе диска, напряжения смятия по контактными граням σ_{CM} и напряжение среза τ_{CP} хвостовика и выступа диска (рис.1.1).

Возможна также дополнительная оценка несущей способности замка под действием растягивающей силы и крутящего момента, вызванного несовпадением линии действия нормальной силы N по обе стороны контактной грани при угле установки лопатки γ отличном от нуля (рис.1.2).

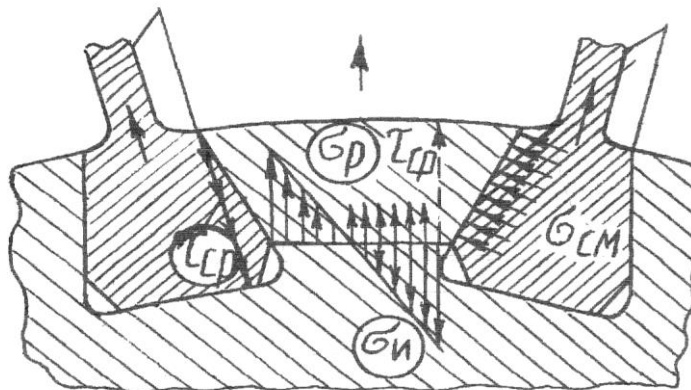


Рис. 1.1. Схема нагружения замка ласточкин хвост

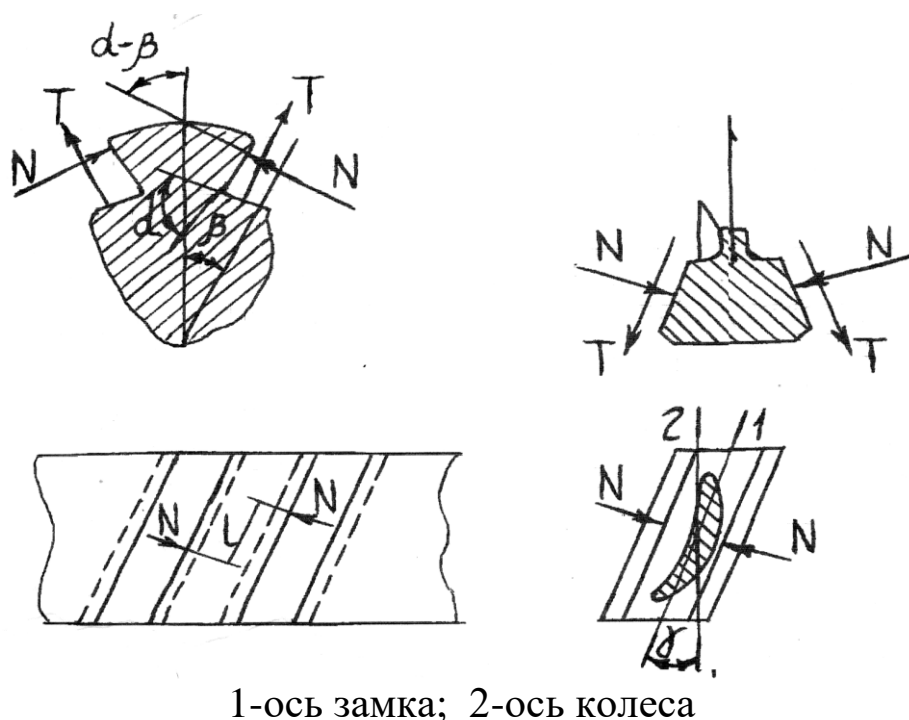


Рис.1.2. Схема действия сил на межпазовый выступ диска при косом замке ласточкин хвост

Угол наклона контактной грани α находится в пределах $\alpha = 45...75^\circ$. Выбор угла α определяется числом лопаток в колесе, допустимыми напряжениями смятия, сопротивлением усталости замка и размерами лопатки. Наиболее распространенным является замок ласточкин хвост с углом $\alpha = 70^\circ$.

В процессе доводки компрессоров отмечаются случаи усталостного повреждения хвостовиков лопаток. Так, у лопаток из сплава ВТ9 с

замком ласточкин хвост с углом $\alpha = 45^\circ$ появлялись усталостные трещины и поломки хвостовика. Очаг усталости находился в непосредственной близости к радиусу перехода от контактной поверхности к торцу хвостовика. В зоне расположения трещины по которой происходило разрушение, имелись следы контактной коррозии, значительно снижающей предел выносливости материала.

Такие дефекты устранялись двумя способами:

- 1) установкой на хвостовики лопаток прокладок толщиной 0.2 мм из сплава ХН78Т. Однако установка их значительно усложняет технологию изготовления и сборки колеса. Кроме того при большой наработке (более 1000 ч) наблюдается износ прокладок;
- 2) изменением угла хвостовика с 45° на 75° с одновременным увеличением длины хвостовика с 32 до 50 мм.

Замковое соединение с углом 75° под воздействием центробежных сил от лопаток является самозаклинивающимся, что предотвращает микроперемещения хвостовиков в пазах диска. Это уменьшает склонность к появлению фреттинг-коррозии. Увеличение длины снижает напряжения на рабочих поверхностях хвостовика. Возможно также контактная коррозия на поверхности замка ласточкин хвост лопаток вентиляторного колеса. Причиной является наличие микроперемещений хвостовиков лопаток в пазах диска при колебании лопаток. Уменьшить проявление дефекта можно с помощью зачистки мест образования контактной коррозии и последующего упрочнения микрошариками. Это увеличивает ресурс, но не исключает дефект полностью.

Наиболее эффективный способ устранения дефекта - накатка роликом (рифление поверхности) рабочих поверхностей хвостовиков. В процессе накатки происходит пластическая деформация, что создает наклеп и остаточные напряжения сжатия и более благоприятную структуру их залегания по сравнению с упрочнением гладкой поверхности. Кроме того, рельеф связанных каналов позволяет удалять с поверхности продукты изнашивания и транспортировать твердый смазочный материал к местам контакта.

Для уменьшения склонности к дефектам усталостного происхождения наиболее часто проявляющихся в замках ласточкин хвост рекомендуется следующее:

- уменьшение статических и переменных напряжений в замке путем усиления перемычки и уменьшение угла установки замка;

- увеличение радиуса перехода в углах паза и его полирование;
- упрочняющая обработка замка, повышающая изгибную и контактную выносливость;
- разгрузка краев замка введением скосов;
- уменьшение переменных напряжений в колесе с помощью частотной отстройки демпфирования или путем устранения источника возбуждения.

Елочный замок

Елочные замки для крепления лопаток применяют с целью размещения большого числа лопаток в колесе. Обычно это замки с более крупными зубьями по сравнению с турбинными и содержат меньшее число пар зубьев.

Наиболее часто встречаются усталостные трещины зубьев замка в условиях существенной асимметрии нагружения.

Для повышения сопротивления усталости и снижения склонности к фреттинг-коррозии замки крепления лопаток упрочняют дробеструйной обработкой, микрошариками или виброобработкой. На контактных поверхностях замков иногда наносят рельефную гравюру в виде многогранников или других фигур.

Шарнирный замок

Шарнирный замок применяют для крепления лопаток с целью отстройки от резонансов низших форм колебаний.

Для повышения сопротивления усталости шарнирных замков используют упрочнение отверстий раскатыванием, которое повышает их предел выносливости примерно на 15%. Введение финишной операции - раскатывания отверстий - обеспечивает в поверхностном слое стабильные сжимающие остаточные напряжения, уменьшает шероховатость поверхностей и увеличивает микротвердость на 25%.

Рабочие лопатки осевых компрессоров

Компрессорные лопатки можно разделить на две большие группы - рабочие лопатки колес и статорные лопатки. Рабочие лопатки работают в более сложных условиях и поэтому их проектированию уделяется особое внимание. Для статорных лопаток многие проблемы отсутствуют, и проектирование менее проблематично.

Статические напряжения в лопатках в основном складываются из напряжений растяжения от центробежных сил и изгибных напряжений от газовых и центробежных сил.

В зависимости от рабочих температур и нагрузок рабочие лопатки выполняют из алюминиевых (ВД17), титановых (ВТ3-1, ВТ6, ВТ8, ВТ9) или жаропрочных сталей (13Х11Н2В2МФ, 15Х12Н2МВФАБ) и сплавов (ХН45МВТЮБР, ХН70ВМТЮБ).

Определяющим видом нагружения для рабочих лопаток компрессора являются переменные напряжения.

Большинство дефектов рабочих лопаток компрессоров связано с повышенным возбуждением переменными нагрузками или недостаточным сопротивлением усталости лопаток.

Для исключения попадания лопаток с пониженным сопротивлением усталости предпринимается следующее:

- введение сплошного контроля микроструктуры штамповок лопаток;
- введение выборочного контроля сопротивления усталости натуральных лопаток (одна лопатка от колеса);
- внедрение технологии гидродробеструйной обработки лопаток, обеспечивающей улучшенное качество поверхности;
- замена марки материала лопаток - ВТ3-1 на ВТ8, имеющего более высокий предел выносливости;
- введение бандажирования лопаток вентилятора.

В процессе доводки бандажированных лопаток часто появляется дефект - изнашивание поверхностей бандажных полок лопаток в месте контакта их между собой. Глубина выработки может составлять до 0.25...1.0 мм.

Для устранения дефекта увеличивается площадь контакта бандажных полок путем изменения толщины полки (высоты контактной поверхности) и ее длины.

Во время использования колес с лопатками, имеющими натяг по бандажным полкам, часто встречается дефект - нестабильность балансировки ротора.

При сборке рабочих колес с полочными лопатками возможен перекося лопаток в замке. Вследствие натяга по полкам возникают силы трения, которые препятствуют выставлению лопаток в рабочее положение, особенно при балансировке колес на малых оборотах. Для устранения этого недостатка рекомендуется вводить обстукивание

лопаток в процессе балансирования и применять групповую балансировку.

Методика групповой балансировки заключается в том, что колесо балансируется не со всеми лопатками, а с группой лопаток через одну. Этот вид балансировки рекомендуется при балансировке колес с вентиляторными лопатками большой массы, где при обычном методе возникают значительные погрешности балансировки.

Недостатком данного метода является удлинение цикла балансировки.

На рабочих лопатках компрессора появляется дефект, связанный с высокочастотными колебаниями. Дефект проявляется в виде обрыва уголка пера рабочей лопатки. Излом лопатки усталостный, с началом у торца пера в зоне выработки при касании торца пера о специальный слой. По мере развития трещина меняет направление с радиального на поперечное.

Устранить подобный дефект можно следующими способами:

- полированием торца лопаток и исключением касания их о защитный слой статора;
- срезанием уголков лопаток (по наружному торцу и по кромкам);
- утолщением кромок периферийных сечений;
- упрочнением поверхности;
- введение разношаговых направляющих аппаратов.

При длительной наработке двигателей, особенно при эксплуатации в условиях загрязненной атмосферы, появляется эрозия входных кромок лопаток. Применение коррозионно-стойких стальных и титановых лопаток со специальными методами структурного и поверхностного упрочнения, а также снижения загрязнения атмосферы уменьшают эрозию лопаток.

Лопатки направляющих аппаратов

Направляющие лопатки компрессоров воспринимают статические и переменные нагрузки от газовых сил.

В зависимости от рабочих температур и нагрузок лопатки направляющих аппаратов выполняют из алюминиевых (ВД17), титановых (BT8, OT4, BT20) или жаропрочных (XN70MBTЮБ, XN45MBTЮБР) сплавов.

Надежная работа направляющих аппаратов зависит от их жесткости, определяющей осевые перемещения.

В направляющих аппаратах с заклепками усталостные трещины возникают на хвостовиках лопаток в зоне отверстий под заклепки. Причиной появления трещин является наличие повышенных переменных напряжений в местах заделки. С целью уменьшения переменных напряжений в месте дефекта увеличивают толщину хвостовика и изменяют конфигурацию хвостовика.

В процессе доводки возникают усталостные поломки уголков нижних полок направляющих лопаток. Дефекты устраняются технологическими мерами.

В результате деформации направляющих аппаратов появляются дефекты в виде касания кромок рабочих лопаток о кромки направляющих лопаток. Исключение дефекта обеспечивается осевыми зазорами между венцами дисков и направляющими аппаратами и кромками лопаток, устанавливаемых с учетом податливости направляющих аппаратов и статистики случаев касания.

Частым дефектом при наработке полочных направляющих аппаратов является наклеп, выкрашивание, сколы уголков лопаток. Причиной являются переменные напряжения в лопатках и изнашивание контактных поверхностей полок, что ослабляет их посадку в местах их заделок. Таким образом, ресурс направляющих аппаратов в значительной мере определяется действием переменных нагрузок с учетом малоциклового нагружения.

1.3. Камера сгорания (КС)

Вследствие особенностей протекания рабочего процесса, значительных механических и тепловых нагрузок в процессе эксплуатации ГТД возможно появление следующих дефектов и нарушений работы КС:

- 1) срыв пламени и прекращение горения топливо-воздушной смеси (помпаж компрессора, снижение массового секундного расхода воздуха, снижение перепада давления в топливной магистрали);
- 2) коробление жаровой трубы жаровой трубы (ЖТ) и ее прогар (помпаж компрессора, снижение массового секундного расхода воздуха, нагар на стенках ЖТ);
- 3) образование термических и усталостных трещин на деталях КС;

4) закоксовывание топливных форсунок.

Термические трещины и деформация вызываются циклическими изменениями температуры и зависят от теплопроводности материала, коэффициента термического расширения, прочности и упругости материала. Возникновению этих повреждений способствует нагарообразование на стенках ЖТ.

Нагарообразование – результат неполного сгорания топлива, вследствие чего частицы углерода осаждаются на деталях газовоздушного тракта. Это приводит к изменению условий охлаждения деталей. Изменение характеристик распыла форсунок при закоксовывании или засорении является причиной значительной неравномерности температурного поля.

Закоксовывание – результат отложения на поверхности форсунок смол и кокса, которые образуются при окислении топлива.

Местное повышение температуры может также происходить из-за нарушения процесса смесеобразования и горения топлива в КС, что обусловлено избытком топлива, ухудшением его распыла или уменьшением количества подаваемого вторичного воздуха.

Камера сгорания является источником вторичных разрушений, так как даже небольшие отколовшиеся фрагменты ЖТ вызывают значительные повреждения лопаток и дисков турбины.

Колебания давления топлива в топливной магистрали вызывает колебания давления газа в КС, в результате чего резко возрастают вибрационные напряжения, особенно в том случае, когда частота этих колебаний совпадает с резонансными частотами жаровых труб и корпуса.

1.4. Газовая турбина

Газовая турбина относится к одному из самых нагруженных как в тепловом, так и в механическом отношении узлов ГТД.

Одной из основных причин, осложняющих условия работы лопаток и дисков турбины, является неравномерность полей давлений и температур перед турбиной, уровень которых определяется работой топливных форсунок и возможным помпажом компрессора. Все это обуславливает возникновение вынужденных колебаний и вибрацию лопаток.

Одним из мероприятий, обеспечивающих исключение резонансных колебаний, является бандажирование.

Крайнюю опасность представляет собой резкий заброс температуры газов, который наблюдается при запуске двигателя

В связи с разнотолщинностью стенок интенсивность их прогрева на различных участках неодинакова, что может привести к возникновению значительных термических напряжений

Центробежные силы вызывают в материале лопаток, кроме растяжения, скручивание и изгиб.

Действие газового потока также обуславливает изгиб, скручивание, вибрацию, термическое растяжение и газовую эрозию.

Разрушение рабочих лопаток турбины вызывается, в основном, высоким уровнем переменных напряжений, возникающих при их резонансных колебаниях. Эти колебания возникают по следующим причинам:

- засорение топливных форсунок;
- температурная деформация и коробление лопаток соплового аппарата;
- неравномерность параметров газового потока по окружности проточной части;
- колебания стоек опор подшипников, реактивного сопла и форсажной камеры.

Усталостному разрушению способствует наклеп от механической обработки и металлургические дефекты. Повторные термические напряжения, возникающие при запуске, останове и смене режимов работы двигателя приводят к растрескиванию кромок лопаток (в зонах с повышенным градиентом температур).

Перегрев лопаток в процессе эксплуатации приводит к статическому разрушению по перу. Возможны случаи смешанного статико-усталостного разрушения, когда статические напряжения вызывают надрыв, а переменные способствуют переходу к усталостному разрушению.

Усталостному разрушению способствуют следующие производственные дефекты:

- обеднение поверхностного слоя легирующими элементами при неправильной термообработке;
- перенаклеп металла;
- остаточные растягивающие напряжения в поверхностном слое.

Под действием высокой температуры может происходить вытягивание лопатки вследствие ползучести материала.

При перегреве лопаток вследствие помпажа или нераскрытия створок сопла при форсаже может происходить интенсивное обгорание лопаток (за 15...20 секунд все лопатки турбины могут обгореть на 50% от первоначальной длины).

Разрушение хвостовиков елочного профиля связано в основном с отклонением геометрии соединения. Разрушению также способствует фреттинг-коррозия на контактирующих поверхностях соединения.

Рабочие лопатки осевых турбин

Рабочие лопатки осевых турбин подвержены наиболее полному комплексу различных видов нагружений, влияющих на их ресурс - статическому, вибрационному, малоцикловому, коррозионному и эрозионному.

Допустимые напряжения в лопатках устанавливают с учетом многокомпонентности нагружения, температуры тела лопатки и применяемого материала.

Наиболее широко для изготовления лопаток турбин применяют деформируемые (ЖС6КП) и литейные (ЖС6К, ЖС6У, ЖС6Ф) жаропрочные сплавы.

Статическая напряженность лопаток и коэффициенты запасов по длительной прочности при заданной окружной скорости колеса и размерах тракта зависят главным образом от отношения площадей корневого и верхнего сечений.

Существенное влияние на коэффициенты запасов оказывает также применяемый материал, методы отливки лопаток, обеспечивающие направленную структуру или монокристаллическую, режимы термической обработки и эффективность охлаждения лопаток. Некоторое повышение жаропрочности материала лопаток при умеренных температурах обеспечивает термомеханическая, механотермическая обработка или гомогенизация.

Характерные поломки лопаток от недостаточной длительной прочности в сочетании с малоцикловым нагружением возникают из-за превышения допустимых температур тела лопаток в средних сечениях. При отсутствии возможности прямого измерения температур лопаток для оценки фактических температур сравнивают микроструктуру

лопаток с микроструктурой образцов, нагретых до разных температур и выдержанных в течение времени, способствующем длительности работы лопаток при максимальных температурах в эксплуатации.

Разрушение от истощения длительной прочности материала лопаток происходит на расстоянии 0,4...0,6 длины лопатки (в зависимости от распределения температур по высоте). Характер излома на всем протяжении статический межзеренного характера.

Растрескивание алитированного слоя в результате истощения длительной прочности и сопротивления термической усталости может происходить на лопатках после большой наработки (15000...18000 ч) без превышения допустимых температур. Мерами по увеличиванию ресурса в этом случае являются: замена материала лопаток на более жаропрочный или применение специальных методов отливки, что повышает жаропрочность, пластичность и термостойкость сплавов.

Разрушение лопаток вследствие истощения длительной прочности бывает в результате нарушения режимов термической обработки.

Статическое повреждение лопаток может происходить и вследствие нарушения режимов механической обработки - появления наклепа и неблагоприятных остаточных напряжений на поверхности пера.

После различной наработки в отдельных местах лопатки появляется групповое и единичное растрескивание поверхности пера. Трещины направлены по границам зерен, распространяются на 2...3 зерна и проявляются либо в уширении границ зерен при травлении, либо в виде извилистых коротких трещин. Глубина трещин колеблется в пределах 0,02...0,2 мм. Эти поверхностные дефекты создают поврежденный поверхностный слой. Явление повреждаемости в процессе длительных испытаний характерно для всех жаропрочных сплавов.

Только 30...50% своего ресурса большинство жаропрочных сплавов не имеют поврежденного слоя. С повышением температуры повреждаемость проявляется быстрее.

Развитию трещин при высоких температурах способствует наличие хрупких составляющих в интерметаллидной фазе, а также легкоплавких примесей свинца, висмута, олова и других, залегающих по границам зерен. Причиной повреждаемости может быть также сернистая коррозия. Для исключения дефекта и восстановления

покрытия рекомендуется исключать из технологии обработки механическую глянецовку пера лопаток, которая проводится с целью снижения шероховатости поверхности пера и снятия нагара перед контролем методом ЛЮМ-1 после испытаний. В замен механической глянецовки целесообразно использовать виброгалтовку и обдувку шлифовальным порошком. Для удаления нагара с лопаток после испытаний вводят химическое травление. При этом сохраняется алитированный слой без повреждений.

Наличие наклепа и остаточных напряжений вызывает ускоренную диффузию и при работе детали в условиях повышенных температур приводит к интенсификации процессов рекристаллизации в поверхностном слое, достаривания, изменения состава материала в результате окисления и как следствие к потере жаропрочности.

Большое количество дефектов на лопатках имеют усталостное происхождение. Это объясняется как трудностью оценки интенсивности возбуждения переменными силами на стадии проектирования, так и повышенной чувствительностью динамических нагрузок и предела выносливости лопаток к условиям эксплуатации и производства.

Источником возбужденных лопаток является неравномерность газового потока, определяемая неравномерностью температурного поля и поля давлений в окружном направлении. Переменные напряжения в лопатках зависят не только от интенсивности возбуждения, но и от демпфирующих свойств конструкции. Одним из наиболее эффективных и универсальных способов уменьшения переменных напряжений в лопатках является демпфирование в конструкции и в материале (рис.1.3).

Характерным дефектом, вызванным колебаниями лопаток, является поломка уголка бандажной полки. Излом имеет усталостный характер. Очаг усталости находится на трактовой поверхности полки напротив первого ребра.

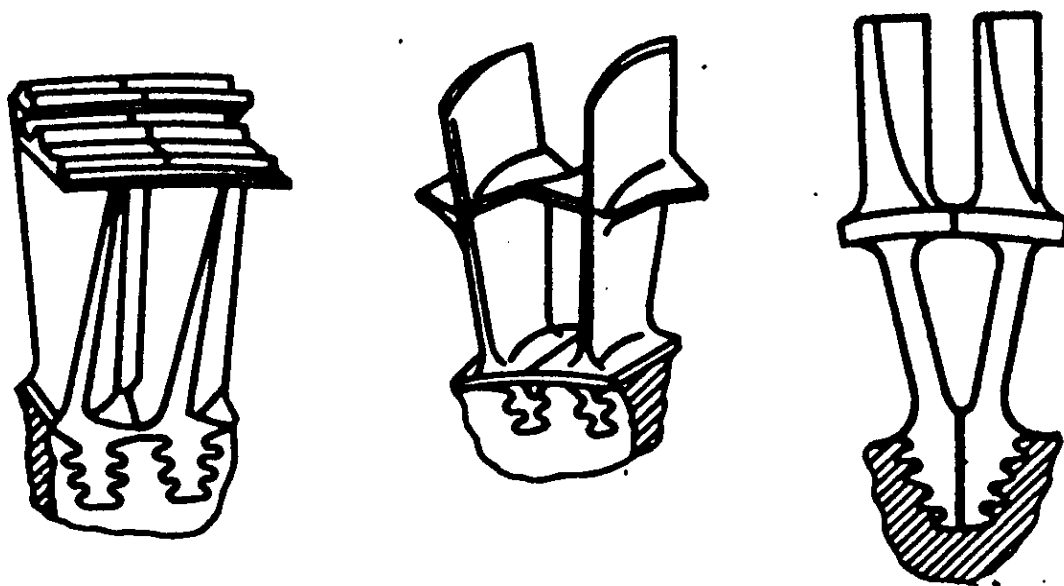


Рис.1.3. Примеры конструкционного демфирования колебаний рабочих лопаток

Причиной дефекта является резонанс колебаний уголка полки с собственной частотой одной из форм колебаний лопатки.

Изменением собственной частоты колебаний уголка полки путем его ужесточения дефект устраняется.

Типичным дефектом для бандажированных рабочих лопаток турбины является изнашивание контактных площадок бандажных полок. Изнашивание зависит от контактных напряжений на гранях полки, уровня переменных напряжений в лопатке, ползучести лопатки, угла наклона контактных граней по отношению к направлению перемещений полки при колебаниях по первым формам, качаний лопатки в замке в свободном состоянии, температуры полки, жаропрочности материала и других причин. Эффективным методом уменьшения изнашивания является также нанесение твердых покрытий на контактные площадки полки или напайка износостойких пластин.

Для повышения сопротивления усталости лопаток турбин используют методы поверхностного упрочнения, которые формируют умеренные остаточные напряжения сжатия при малой степени пластической деформации.

Замки крепления рабочих лопаток турбин

Замки крепления рабочих лопаток турбин воспринимают центробежные силы лопаток и изгибающие моменты от центробежных и газовых сил, действующих на лопатки.

Одним из наиболее распространенных видов крепления рабочих лопаток турбины является елочный замок. В этом креплении рационально используется площадь обода диска, так как сечения с максимальными напряжениями в хвостовиках лопаток и перемычках дисков разнесены на разные радиусы. Кроме того, более равномерно передается центробежная сила лопаток на диск по сравнению с креплениями других видов - без большой концентрации усилий.

Напряженность замков обычно оценивается по номинальным напряжениям растяжения по первой впадине (со стороны пера) хвостовика лопатки σ_L и первой впадине (со стороны полотна) межпазового выступа диска σ_D , а также напряжениями среза τ , смятия σ_{CM} и изгиба σ_I зубьев (рис. 1.4). Номинальные напряжения растяжения по другим перемычкам обычно меньше, чем по первым впадинам. Это обуславливается конструктивными и технологическими соображениями, исходя из которых требуется выдерживать размер по последней впадине хвостовика лопатки выше некоторого минимального значения.

В процессе длительных испытаний встречаются разрушения и повреждения замков от недостаточной длительной прочности и усталости. Для полых замков охлаждаемых лопаток наблюдается также дефект - продавливание замков. В замках с недостаточно свободной посадкой при применении для лопаток материала с коэффициентом линейного расширения больше, чем у диска, или при температуре хвостовика, превышающей температуру межпазового выступа, возможно расклинивание замка и появление трещин по радиусам впадин.

Для исключения поломок от недостаточной длительной прочности можно рекомендовать: снижение температуры путем охлаждения, применение материала с повышенной жаропрочностью, изменение конструкции замка для снижения опасных напряжений (при срезе - укрепление зубьев, уменьшение их числа; при разрыве перемычки - увеличение угла развала замка).

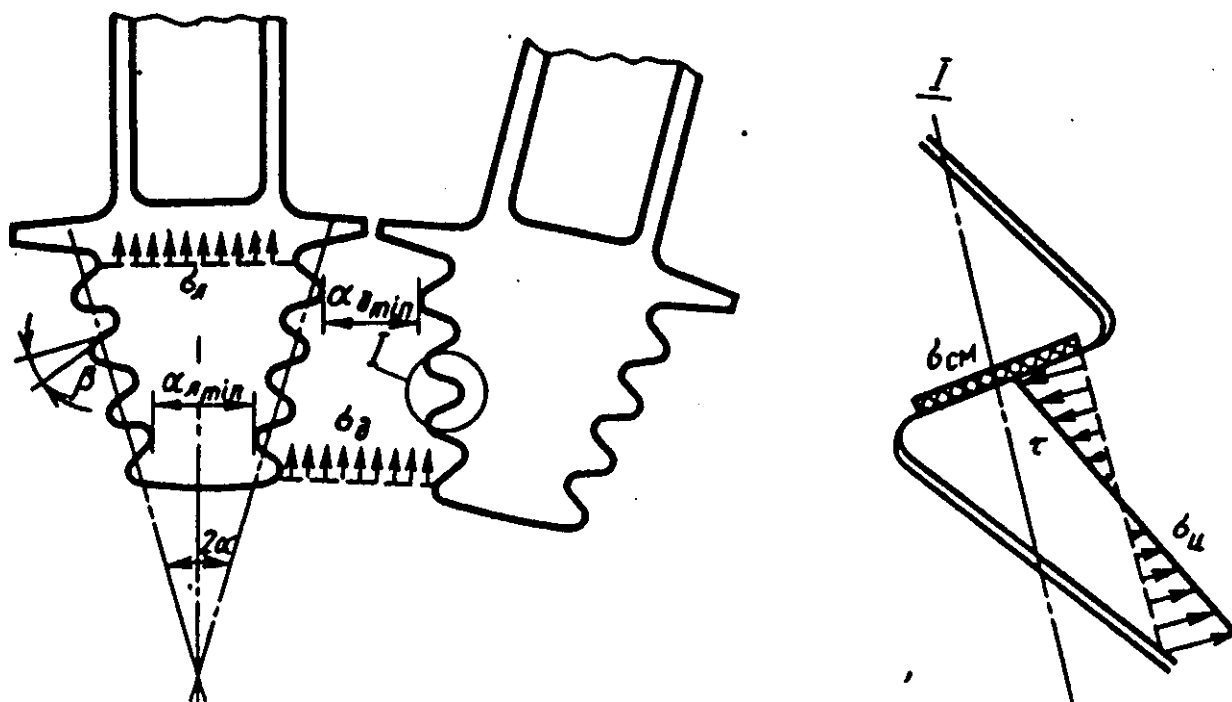


Рис. 1.4. Схема елочного замка крепления рабочих лопаток турбины и распределение номинальных напряжений

При утолщении контровки возникают трещины на нижнем зубе замка лопатки. Трещины усталостные глубиной 1...1,2 мм. Дефект связан с уменьшением толщины зуба замка с 2,1 по 1,78 мм по сравнению с остальными зубьями (в связи с увеличением толщины контровки с 2...2,5 мм), повышенными напряжениями в зубьях замка лопатки при связанных колебаниях системы диск - лопатки и неудовлетворительным прилеганием зубьев по рабочим поверхностям замка. Для исключения дефекта восстанавливается толщина зуба до 2,1 мм путем углубления паза в диске, производится отстройка колеса от резонанса связанных колебаний, вводится технология глубинного шлифования замка на станке «Эльбшлиф».

Трещины на нижних зубьях замка возникают на лопатках турбины 2-й ступени из деформируемого сплава ЖС6КП. Характер трещин усталостный. Переменные напряжения на доньшке замка не превышают

10 МПа. Дефект связывается с плохим прилеганием по замку. Для устранения дефекта вместо фрезерования для повышения точности изготовления замка вводят глубинное шлифование на станке «Эльбшлиф».

При усталостных поломках, прежде всего, следует проводить технологические мероприятия, так как сопротивление усталости - параметр, весьма чувствительный к технологии производства. Изменение режимов резания с целью уменьшения повреждаемости от обработки, снижение шероховатости поверхности, применение термообработки для снятия остаточных напряжений, введение упрочняющих методов обработки могут полностью устранить дефект без проведения конструктивных мероприятий.

Эффективным средством уменьшения переменных напряжений, действующих на замок, является бандажирование рабочих лопаток. Существенное влияние на сопротивление усталости замка может оказывать нависание профильной части пера.

Для исключения продавливания замков поперечными силами наиболее эффективным средством является постановка перемычек во внутреннюю полость.

Для устранения растрескивания в замках при их расклинивании желательно применять материалы лопаток и дисков с близкими коэффициентами линейного расширения, обеспечивать необходимую свободу посадки хвостовика лопатки и в необходимых случаях применять разношаговость.

Работоспособность замков крепления лопаток определяется длительной прочностью, малоцикловой и многоцикловой усталостью.

Упрочняющие методы обработки замков повышают их сопротивление многоцикловой и малоцикловой усталости при слабом влиянии на длительную прочность.

Диски осевых турбин

Диски турбины во время работы подвергаются действию центробежных сил, крутящего момента, гироскопического момента, перепада давлений и неравномерного нагрева. Влиянием крутящего момента обычно пренебрегают. Для дисков турбин обычно применяют жаропрочные сплавы ХН77ТЮР, ХН73МБТЮ, ХН62БМКТЮ.

Одним из наиболее распространенных дефектов турбинных дисков является их поверхностное растрескивание, наблюдаемое после различной наработки. Растрескивание часто бывает на дне пазов елочных замков, на радиусах перехода полотна к ободу и ступице при обработке их радиусными резцами, при ударном клеймении.

Растрескивание обычно происходит по границам зерен, его глубина - от 0,01 до 0,3 мм. Такое же растрескивание наблюдается и на образцах в процессе испытания на длительную прочность. Первые трещины появляются задолго до разрушения образцов. В зависимости от условий испытаний - напряжений и температуры, прочности и пластичности материала, состояния поверхностного слоя обычно - растрескивание может появляться через 10...90% времени от ресурса до разрушения.

В некоторых случаях при неблагоприятных условиях резания, например, при протягивании дна паза елочных замков протяжкой с большим подъемом на зуб и без затыловки боковых граней возможны микроповреждения и большие сдвиговые деформации поверхности на новых, неработавших дисках. Указанные повреждения снижают выносливость обода диска и в отдельных случаях могут приводить к развитию усталостных трещин.

Встречаются разрушения дисков турбины от исчерпания длительной прочности материала. При отработанных методах расчета дисков на прочность это возможно при недостаточно достоверной оценке температурного состояния диска или при завышении режимов работы двигателя.

Возможны разрушения дисков при больших ресурсах работы от недостаточного сопротивления малоцикловому нагружению. Особенно неблагоприятно сказываются в этих условиях различного ряда концентраторы (например, отверстия), которые могут существенно, не влияя на статическую прочность, резко снижать малоцикловую усталость.

При наработке 3000...5000 полетных циклов наблюдается дефект в виде растрескивания и разрушения диска по диаметральным сечениям, проходящим через отверстия. Дефект обусловлен исчерпанием малоциклового усталости в связи с повышенным коэффициентом концентрации напряжений в отверстиях и повреждением поверхностного слоя при обработке.

Для повышения долговечности дисков по малоциклового усталости следует повышать качество обработки отверстий, вводить пневмодинамическое упрочнение поверхности и усиливать диски в районе отверстий для уменьшения номинальных напряжений. Эффективность мер можно проверять на образцах с отверстиями, имитирующими реальный коэффициент концентрации. При

пневмодинамическом упрочнении отверстий уменьшается разброс результатов.

Наблюдаются усталостные трещины с началом в месте прерывистого течения упрочненной поверхности на глубину 0,1 мм (для устранения биения). На поверхности обнаружены сдвиговые деформации на глубину 0,2 мм, остаточные напряжения растяжения до 400 МПа и снижение предела выносливости на 30%.

Существенное влияние на прочность дисков оказывают также циклические нагревы и охлаждения, связанные с приемистостями и сбросами газа. Максимальный прямой перепад (т.е. обод горячей ступицы) наблюдается при увеличении частоты вращения, максимальный обратный перепад - через несколько минут после сброса газа.

Факторами, исчерпывающими ресурс дисков турбины, являются: длительная прочность, малоцикловая и многоцикловая усталость и термостойкость. В зависимости от преобладающего характера повреждения назначаются методы и режимы упрочнения.

Лопатки сопловых аппаратов турбин

Сопловые лопатки турбин испытывают изгиб от газовых сил и тепловые нагрузки от неравномерного нагрева сечения лопаток. Лопатки 1-й ступени обычно являются двухопорными, 2-й и последующих ступеней - консольными или с подвижной внутренней заделкой. Лопатки испытывают изгибные напряжения от нагрузок, действующих на них, и от сосредоточенных сил, передаваемых от диафрагмы.

Лопатки сопловых аппаратов обычно выполняют полыми для возможности охлаждения и повышения жесткости, литыми из жаропрочных сплавов ЖС6К, ЖС6У, ЖС30.

Для оценки статической прочности в лопатках определяют номинальные напряжения как в балках при косом изгибе от действия распределенных по лопатке газовых сил и от сосредоточенных сил на внутренних концах консольных лопаток. Существенное влияние на надежность сопловых лопаток, особенно охлаждаемых, оказывают температурные напряжения от неравномерного нагрева, которые на нестационарных режимах работы двигателя имеют наибольшие значения.

Дефекты появляются в виде прямолинейных, окисленных трещин транскристаллического или смешанного характера (рис. 1.5).

Для устранения термоусталостных трещин разрабатывают сопловые лопатки с более эффективным охлаждением:

- увеличивают радиус входной кромки, при этом возрастает отвод тепла;
- вводят оребрение внутренней полости с целью увеличения жесткости оболочки и стабилизации зазора между лопаткой и внутренним дефлектором;
- вводят дополнительно ряд турбулизаторов во внутренней полости;
- увеличивают расход охлаждающего воздуха на входную кромку путем увеличения диаметра отверстий в дефлекторе на входной кромке. На корыте и спинке дефлектора выполняют отверстия;
- изменяют подвод воздуха - выполняют его снизу с целью более полного исключения возможности засорения дефлекторов.

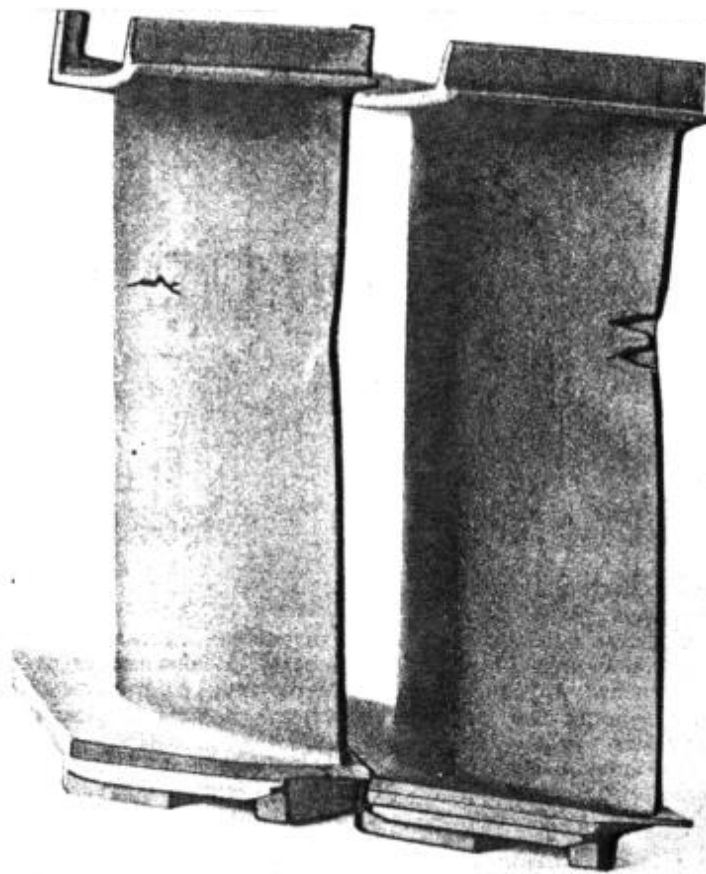


Рис. 1.5. Термоциклические трещины на сопловых лопатках турбины

На входных кромках охлаждаемых лопаток появление трещин иногда связывают с остатками стержневой массы во внутренней полости, ухудшающей охлаждение кромок.

Часто проявляемым дефектом на сопловых лопатках турбины является газовая коррозия, связанная с недостаточной жаростойкостью материала. Одним из методов повышения жаростойкости является алитирование лопаток на глубину 0,02...0,04 мм, что повышает жаростойкость в 4 раза, или нанесение многокомпонентных покрытий.

После наработки в эксплуатации 1500...2000 ч обнаруживается растрескивание по паяным швам на крышках и донышках секций соплового аппарата 1-й ступени.

Причиной дефекта является недостаточная поверхность сцепления по паяному соединению и повторный нагрев после пайки при алитировании лопаток, что приводит к охрупчиванию тонких пластин. Для устранения дефекта следует увеличить поверхность сцепления путем повышения буртика на 2 мм и операцию пайки после алитирования лопаток перенести в вакуумную печь. Алитированный слой в местах пайки зачищать до металлического блеска.

Факторами, исчерпывающими ресурс сопловых лопаток, можно считать длительную прочность, термостойкость, жаростойкость.

1.5. Основные дефекты подшипников опор ротора

Роторы компрессора - турбины опираются на роликовые и шариковые подшипники, расположенные в опорах. Роликовые подшипники, воспринимают радиальные нагрузки, шариковые - радиальные и осевые.

Повреждения и разрушения подшипников могут быть разделены на следующие группы:

- 1) разрушения от усталости металла;
- 2) повреждения от повышенного износа;
- 3) разрушения, вызванные изменением зазоров и посадок между деталями подшипника и опорами ротора;
- 4) разрушения и повреждения из-за недостатка смазки.

Усталостные разрушения проявляются в виде ямок или выкрашивания материала дорожек колец и тел вращения. Этому явлению способствуют:

- дефекты материала;
- неуравновешенность ротора;
- нарушение ТУ при сборке и монтаже;
- прижоги при шлифовании;
- коррозионные повреждения;
- вмятины и забоины.

Основные нагрузки на подшипник определяются центробежными силами от тел качения, поэтому чаще всего разрывается внешнее кольцо. Износ деталей выше допустимого приводит к увеличению радиальных зазоров, что определяет смещение ротора. Чрезмерный износ может вызвать повреждение других деталей, омываемых маслом.

Кроме тел качения, износу подвергаются сепаратные кольца (по причине неправильного монтажа - переноса).

При некоторых условиях работы возможно проскальзывание внутреннего кольца относительно тел качения из-за наличия радиального зазора. При этом на дорожке качения образуются следы схватывания и наволакивания металла в результате чего овальность внутренней дорожки достигает 0,1...0,2 мм.

Причинами изменения зазоров и посадок в соединениях при работе двигателя являются:

1) изменение размеров деталей при запуске в условиях низких температур (тела качения нагреваются быстрее колец и может произойти заклинивание подшипника);

2) проворачивание колец на валу или в корпусе из-за неверной сборки.

При недостаточной смазке (масляное голодание) имеет место оплавление и износ тел качения, наволакивание их материала на дорожки колец, износ сепаратора. При временном прекращении подачи масла беговые дорожки имеют гладкую приработанную поверхность, а наплавленный слой равномерно распределен по окружности.

При масляном голодании тела качения нагреваются быстрее колец, что может привести к заклиниванию подшипника, т.е. возникает скольжение тел качения по беговой дорожке и их быстрый износ. При этом в первую очередь разрушается подшипник средней опоры, то есть происходит смещение ротора в осевом направлении, после чего наступает износ деталей ротора и его резкое торможение.

При разрушении подшипника турбины возможно воспламенение масла и пожар в двигателе.

Отмечают изнашивание сепаратора роликового подшипника турбины по наружному диаметру. Причиной дефекта является изменение геометрии наружного кольца подшипника при затяжке гайки крепления крышки лабиринта. При затяжке гайки передний бурт наружного кольца подшипника уменьшается на 0,02 мм, что уменьшает зазор между этим буртом и сепаратором.

На беговых дорожках внутреннего и наружного кольца роликового подшипника отмечаются следы проскальзывания роликов с образованием прижогов и цветов побежалости на части дуги беговых дорожек ($\sim 60^\circ$). Наличие цветов побежалости на обоймах свидетельствует о повышении температурного режима подшипника, вызванного проскальзыванием роликов вследствие возможного выбора радиального зазора при неблагоприятных сочетаниях допусков и недостаточном охлаждении подшипников.

Отмечают точечное выкрашивание в окнах сепаратора роликоподшипника вследствие недостаточной выносливости дюралюминиевого сепаратора (Д1Т). Для повышения сопротивления усталости применяют бронзовые сепараторы (БрАЖМЦ 10-3-1,5), обладающие лучшими антифрикционными свойствами и повышенной прочностью ($\sigma_B = 600$ МПа вместо $\sigma_B = 380$ МПа). Дюралюминиевые сепараторы заменяют на бронзовые в радиально-упорном шарикоподшипнике, где имеются усталостные поломки перемычек сепараторов. Усиливают перемычки сепараторов также исключением проточки по наружному диаметру. Вводят виброгалтовку сепаратора с последующим серебрением глубиной слоя 0,012...0,02 мм, увеличивают фаски на окнах под шарики и уменьшают допустимые отклонением окон от номинального положения. Вводят люминесцентный контроль сепаратора, улучшают смазывание и охлаждение подшипника.

Характерный дефект, являющийся следствием недостаточного эффективного смазывания и охлаждения подшипника - неравномерное изнашивание шариков. Шарик принимает форму эллипсоида, у которого максимальная разница в размере осей доходит до 0,026 мм.

В результате перекоса наружного кольца шарикоподшипника отмечается неравномерный след качения шариков на беговых дорожках колец, повреждение поверхностей шариков и беговых

дорожек, неравномерная нагрузка на шарики. Перекос вызывается деформацией корпуса под действием момента от несимметрично приложенной осевой силой, а также вследствие теплового и эксплуатационного коробления сепаратора.

Наблюдается разрушение подшипника коробки приводов агрегатов. Дефект обнаруживается по сигналу датчика наличия стружки в масле. При осмотре на маслофильтре обнаруживают бронзовую и стальную стружки. На перемычках сепаратора обнаруживают усталостные трещины с началом от острой кромки, которая недостаточно притуплена. Причиной дефекта являются погрешности при изготовлении сопрягаемых деталей подшипникового узла, приводящие к нарушению кинематики подшипника, повышенному тепловыделению и последующему выходу из строя, что усугубляется также наличием разъема внутреннего кольца и относительно малым радиальным зазором в подшипнике. Для устранения дефекта скругляют острые кромки, осуществляют двойную виброобработку и серебрение сепараторов, улучшают технологию сборки узла.

Отмечают случаи разрушения межвального подшипника турбины. Внешние признаки разрушения:

- 1) повышение вибрации на опоре турбин до 100...120 мм/с;
- 2) повышение температуры масла на выходе из турбины;
- 3) заклинивание роторов после остановки.

На внутренней обойме подшипника появляются грубые следы трения, ролики приобретают одностороннюю выработку. Сепаратор и наружная обойма свариваются между собой. Причиной дефекта является выбор зазора плавления сепаратора вследствие перегрева, который происходит из-за масляного голодания, вызванного отклонениями при изготовлении каналов, подводящих масло к межвальному подшипнику.

Устраняют дефект улучшением смазывания и обеспечением стабильности подвода масла к межвальному подшипнику.

В повреждениях, замеченных у радиально-упорных подшипниках отмечают случаи разрыва сепаратора. Из-за возникающей в результате нагружения усталости материала происходит разрыв боковых перемычек. Как следствие на таких разрушенных изделиях с разрушенными сепараторами осевая сила

оказывается заниженной, близкой к нулю. Причина дефекта - повышенный перекося кольца.

Таким образом, ресурс работы подшипников качения определяется сопротивлением усталости; износостойкостью; контактной выносливостью.

1.6. Основные эксплуатационные дефекты ротора двигателя

Одним из наиболее опасных режимов работы ротора является работа на критических режимах. В этом случае от действия вибраций высокого уровня возможно появление следующих повреждений:

1) трещины на силовых стойках и силовых элементах корпусов, особенно в деталях из листового материала;

2) односторонний радиальный износ беговой дорожки внутреннего кольца подшипника качения и его разрушение из-за больших радиальных нагрузок;

3) разрушение сепараторов подшипников качения из-за больших относительных перемещений сепаратора в подшипнике, вызванных колебаниями опор ротора;

4) надирь по торцам рабочих лопаток и гребешкам лабиринтных уплотнений;

5) остаточная изгибная деформация вала;

6) разрушение штифтовых соединений ротора;

7) заклинивание ротора в корпусе;

8) разрушение креплений агрегатов, приборов и трубопроводов на корпусе двигателя, от действия больших инерционных нагрузок.

1.7. Эксплуатационный износ трущихся деталей ГТД, омываемых маслом и основные неисправности системы смазки

Интенсивность износа трущихся поверхностей деталей ГТД, омываемых маслом, неодинакова по времени их работы.

В процессе приработки сопрягаемых деталей в первые часы эксплуатации двигателя наблюдается интенсивный износ трущихся поверхностей, т.е. увеличение зазора от S_1 до S_2 . Далее процесс износа носит стабильный характер, и увеличение зазора происходит менее интенсивно. При наработке двигателя τ_3 величина износа достигает предельного допустимого значения, так как увеличение зазора более

S_3 приводит к опасному росту динамических нагрузок и может вызвать разрушение сопряженных деталей. Нарботка соответствует межремонтному сроку службы сопрягаемых деталей.

Применяемые для смазки ГТД минеральные и синтетические масла резко ухудшают свою способность поддерживать износостойкость деталей при обводнении и насыщении топливом.

Обводнение приводит к увеличению коэффициента кинематической вязкости при низких температурах, что вызывает снижение интенсивности циркуляции в маслосистеме и ухудшение процесса отвода тепла от трущихся деталей.

Насыщение масла топливом ведет к снижению коэффициента кинематической вязкости, что вызывает уменьшение прочности смазывающей пленки.

Характерными неисправностями системы смазки являются:

- появление стружки в масле;
- перерасход масла;
- падение или колебание давления масла;
- разжижение или загустение масла;
- перегрев масла.

К основным причинам появления стружки в масле относят:

- 1) разрушение подшипников;
- 2) износ маслоуплотнительных колец и кольцедержателей;
- 3) износ корпуса и барабана масляной центрифуги;
- 4) износ деталей приводов.

В качестве основных причин разрушения трубопроводов можно рассматривать повышенный уровень вибрации и наличие повреждений на трубопроводах (забоины, потертости, дефекты сборки и материала).

Обычно масляные уплотнения включают комплект угольных и стальных колец, сопряженных по боковым поверхностям. Состояние указанных поверхностей определяет эффективность работы уплотнения.

В большинстве случаев основным методом контроля работоспособности агрегатов маслосистемы служит контроль давления масла на входе в двигатель.

1.8. Характерные неисправности вспомогательных узлов и агрегатов ГТД

Детали приводов

Основными повреждениями деталей приводов являются:

- неравномерный или повышенный износ;
- выкрашивание материала;
- локальный перегрев;
 - попадание стружки и других твердых частиц в каналы и на трущиеся поверхности.

Выкрашивание носит усталостный характер, обуславливаемый действием высоких контактных напряжений в поверхностных слоях зубьев. Этому процессу способствуют:

- неравномерное распределение нагрузки по ширине зуба;
- прижоги поверхности при шлифовании;
- искажение профиля зуба при эксплуатации;
- охрупчивание поверхности при неверной термообработке.

К основным причинам разрушения зубьев относятся:

- недостаточная прочность материала;
- высокий уровень вибраций;
- отступление от ТУ при изготовлении;
- износ зубьев;
- заклинивание при недостаточных зазорах и попадании посторонних предметов.

Основными методами диагностирования повреждений являются:

- спектральный анализ масла;
- виброакустический метод.

Валы

Для валов применяются азотируемые (38ХМЮА, 40ХН2МА), цементуемые (12Х2НВФА), конструкционные (13Х11Н2В2МФ, 15Х12Н2МВФАБ), жаропрочные (10Х11Н20ТЗФ) стали и жаропрочные сплавы (ХН68ВМТЮК, ХН77ТЮР).

В процессе доводки на валах обычно появляются дефекты, связанные с переменными нагрузками, вызывающими усталостные поломки валов и изнашивание шлиц.

Появляются трещины на трансмиссионном валу (материал 13Х11Н2В2МФ), вызванные повреждениями от приварки точечной

сваркой фольги крепления проводов для термометрирования. Усталостная трещина, начинающаяся от внутренней фаски отверстия, выполненного для прокладки проводов. Микроструктура сплава - сорбитная, нормальная для стали 13X12H2B2MФ. У отверстия по месту приварки фольги обнаруживают изменение микроструктуры и повышенную травимость, что указывает на наличие трооститной структуры. Повреждения от точечной сварки могут снижать предел выносливости материала в несколько раз.

Имеются разрушения вала от повреждения, вызванного грубым шлифованием припуска под балансировку. Регламентирование режимов и задание равномерного съема материала на полуокружности вала исключает появление подобного дефекта. Для повышения надежности валов вводят их упрочнение методом алмазного выглаживания и дробеструйной обработки (шлицы).

Отмечают разрушение вала с началом от внутренней поверхности в месте перехода конической части в цилиндрическую.

Зубчатые колеса

Обычно зубчатые колеса выполняют из сталей: 12X2H4A; 12X2HBФА; 13X3HBM2ФА, подвергая цементации или азотированию зубья и ободья. Большинство нагруженных зубчатых колес коррегируют с целью увеличения их прочности и долговечности. Иногда зубчатые колеса подвергают дробеструйной или другой упрочняющей обработке или электрополированию. Дробеструйная обработка создает благоприятные сжимающие напряжения, электрополирование снижает шероховатость и обеспечивает более равномерное нагружение зуба благодаря фланкированию и бомбированию профилей, а также способствует надежному выявлению шлифовочных прижогов.

Силовые зубчатые колеса часто имеют специальную выкружку, очерченную увеличенным радиусом и обычно не шлифуемую после термообработки во избежание появления прижогов в опасном сечении у корня зуба.

Наиболее характерные дефекты зубчатых колес в процессе доводки: усталостные поломки зубьев и обода, скол зубьев, выкрашивание рабочих поверхностей в полюсе и у ножки зуба, заедание, изнашивание.

При усталостных поломках зубьев часто наблюдается подслоное разрушение, когда трещина зарождается не на поверхности, а под упрочненным слоем. Это определяется соотношением изгибных напряжений и предела выносливости материала на поверхности и под слоем.

Меры устранения усталостных поломок:

- 1) отстройка колес от резонансных частот, уменьшение нагрузок, повышение точности изготовления;
- 2) ужесточение контроля;
- 3) введение предохранительных муфт на агрегатах;
- 4) упрочнение поверхности (дробеструйная обработка).

Для уменьшения выкрашивания, заедания и изнашивания можно рекомендовать следующее: уменьшение нагрузки; повышение точности; снижение шероховатости профилей зубьев (виброшлифование); фланкирование и бомбирование; упрочнение зубьев наклепом; при местном выкрашивании по краям зубьев - уменьшение перекосов.

Целесообразно также вводить в масло антифрикционные присадки.

Таким образом, ресурс зубчатых колес определяется в основном их сопротивлением усталости и контактной выносливостью зубьев.

Трубопроводы

Трубопроводы подвержены повреждениям типа вмятин, надрезов, местного износа. При неправильном монтаже возможны трещины от вибрации, скручивания, местный износ. Часть трещин возникает в местах сварных швов и коррозионных повреждений. Возможны разрывы резиновых и бронированных шлангов, особенно в местах заделки.

Основные неисправности выявляются визуально-оптическим методом.

Корпус и узлы подвески

В местах приложения концентрированной нагрузки возможна деформация несущих элементов. Наличие овальности и фреттинг-

коррозии на посадочных местах свидетельствует о нежелательной вибрации, перемещении сопрягаемых деталей.

Неравномерный износ лабиринтного уплотнения свидетельствует о деформации корпуса и разбалансировке ротора.

Повышенный односторонний износ уплотнительных покрытий со смещением в осевом направлении указывает на общую деформацию корпуса двигателя, возникшую при полетах с большими перегрузками.

Корпуса, опоры, оболочки

Материалы, применяемые для корпусных деталей: магниевые сплавы ВМЛЗ, МЛ11; алюминиевый сплав Д16Т; титановые сплавы ОТ4, ВТ20; сталь 10Х11Н20ТЗР; жаропрочные сплавы ХН77ТЮР, ХН45МВТЮБР, ХН60ВТ.

Дефектом оболочек является потеря устойчивости, приходящая под действием изгиба, сжатия, давления или кручения. Может происходить общая потеря устойчивости между ребрами.

На кожухе задней опоры, в местах приварки точечной сваркой усиливающих накладок обнаруживаются усталостные трещины, исходящие из сварных точек.

Причина дефекта - вибрации кожухов и пониженный предел выносливости материала с наличием точечной сварки и повышенным уровнем статистической напряженности, возникающей из-за неудовлетворительной компенсации температурных расширений.

Усталостные трещины наблюдаются на титановых лопатках выхлопного устройства.

После циклического испытания обнаруживают трещину в направлении от кромки плиты камеры сгорания к окну подвода воздуха в форсунку.

Причина дефекта - высокие термические напряжения, вызванные неравномерным нагревом кромок плиты.

На лентах демпферного пакета опоры в уголке штамповочного паза появляются трещины с началом у радиуса шпоночного паза. Наблюдается подрез материала ленты и ее утончение до 0,05...0,1 мм. Причины дефекта - отсутствие фасок по шпоночному пазу, подрез материала ленты с утончением при снятии заусенцев.

Таким образом, ресурс работы опор, корпусов и оболочек определяется длительной прочностью, ползучестью, сопротивлением усталости, устойчивостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бернс В.А. Диагностика дефектов органов управления самолетом по параметрам вибраций: учебное пособие. Новосибирск: НГТУ, 2013
2. Кошкин В.В. Техническая диагностика систем: конспект лекций. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2017
3. Пояркова, Е.В., Горелов, С.Н. Диагностика повреждений металлических материалов и конструкций: учебное пособие Оренбург: ОГУ, 2014
4. Черепанов О.И., Черепанов Р.О. Идентификация и диагностика систем: учебное пособие. Томск: ТУСУР, 2016
5. Бернс В.А. Диагностика и контроль технического состояния самолетов по результатам резонансных испытаний. Новосибирск: НГТУ, 2012
6. Руководство по организации сбора, обработки и использования полетной информации в авиапредприятиях гражданской авиации Российской Федерации, изд. «Воздушный транспорт», 2002г.
7. Основы теории технической диагностики. Методические указания под ред. д.т.н. А.П. Ушакова, Академия ГА, часть 1, 2002г.

