Дефектоскопия деталей при эксплуатации авиационной техники

ДЕФЕКТОСКОПИЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Под редакцией канд. техн. наук
П. И. Беды

Ордена Трудового Красного Знамени
ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СССР
МОСКВА — 1978

ББК 68.9
Д39
УДК 623.74

Коллектив авторов: П. И. Беда, Ю. А. Глазков, С. П. Луцько, А. И. Угаров, Г. С. Шелихов.

Д39 **Дефектоскопия** деталей при эксплуатации авиационной техники. — М.: Воениздат, 1978. — 231 с. с ил.

В пер.: 95 к.

В книге изложены основные сведения по оптико-визуальному, капиллярному цветному, магнитопорошковому, токовихревому, ультразвуковому и импедансному методам неразрушающего дефектоскопического контроля, применяемым при эксплуатации авиационной техники для выявления дефектов типа нарушения сплошности материала деталей. Рассмотрены возможные дефекты деталей, подлежащие обнаружению. Вскрыты ошибки, допускаемые как по технологии применения средств дефектоскопии, так и по расшифровке результатов контроля.

Книга предназначена для инженерно-технического состава подразделений авиации Вооруженных Сил СССР и Министерства гражданской авиации.

Д $\frac{31808\text{-}186}{068(02)-78}$ 234—78

ББК 68.9
6П3.4

© Воениздат, 1978

ПРЕДИСЛОВИЕ

В решении задач по дальнейшему повышению качества и технического уровня продукции, поставленных XXV съездом КПСС на 10-ю пятилетку, существенная роль принадлежит дефектоскопическому контролю материала деталей, механизмов и узлов. Без высокоэффективного дефектоскопического контроля, проводимого на стадиях производства и эксплуатации техники, невозможно обеспечить высокий уровень ее надежности и большой ресурс. Особенно велико его значение в такой области техники, как авиационная, в которой дефектоскопия является одним из важных факторов обеспечения безопасности полетов.

При эксплуатации авиационной техники, используя средства дефектоскопии, проводят разовый и периодический контроль рабочих лопаток и дисков турбин и компрессоров ГТД, силовых шпангоутов, стрингеров и лонжеронов, лопастей воздушных винтов самолетов и вертолетов, стоек и колес шасси и других нагруженных деталей и узлов планера и двигателя. Средства дефектоскопии позволяют оценивать сплошность материала детали, его физико-механические свойства, толщину защитных покрытий, размеры скрытых от прямого наблюдения элементов деталей, внутреннюю структуру приборов и агрегатов.

В книге описаны основные методы дефектоскопического контроля, используемые для оценки технического состояния материала деталей и узлов авиационной техники в эксплуатации. Книга состоит из восьми глав.

Первая глава является вводной и раскрывает место дефектоскопического контроля в деятельности инженерно-авиационной службы на различных этапах развития авиационной техники, особенности эксплуатационной дефектоскопии в отличие от дефектоскопии, применяемой в авиационной промышленности. В ней дана также сравнительная характеристика методов контроля, рассмотрены вопросы его эффективности.

В каждой из последующих пяти глав, расположенных в порядке повышения сложности методов, описаны специфические задачи, решаемые оптико-визуальным, капиллярным цветным, магнитопорошковым, токовихревым, ультразвуковым методами, их физическая сущность, средства контроля и технология их применения, основные ошибки, допускаемые в процессе контроля как по

применению технических средств дефектоскопии, так и по расшифровке результатов контроля, изложены рекомендации по технике безопасности.

Вопросы рентгеновского контроля, который в полевых условиях применяется значительно реже других рассматриваемых методов дефектоскопии, приведены в гл. 7. В ней материал изложен не так подробно, как в предыдущих пяти главах, и предназначен лишь для того, чтобы охарактеризовать технические возможности и область применения рентгеновского просвечивания в условиях эксплуатации.

Глава 8 содержит общие рекомендации по выбору метода контроля в зависимости от дефектоскопических характеристик деталей, а также рекомендации по организации контроля, созданию лаборатории по дефектоскопии в подразделениях, эксплуатирующих авиационную технику.

Особенностью изложения материала книги является его практическая направленность, он должен оказать помощь авиационным специалистам в организации контроля и в непосредственном его проведении.

Книга написана на основе опыта авторов в проведении научно-исследовательских работ в области дефектоскопии, разработке составов дефектоскопических материалов, конструкций дефектоскопов и методических руководств и практического применения средств дефектоскопического контроля.

Книга рассчитана на инженерно-технический состав подразделений авиации Министерства обороны и Министерства гражданской авиации, курсантов, слушателей, студентов и инструкторско-преподавательский состав технических средних и высших учебных заведений Министерства обороны и Министерства гражданской авиации при изучении курса эксплуатации авиационной техники. Она может быть использована специалистами, решающими вопросы обеспечения качества продукции и эксплуатационной надежности изделий в различных отраслях промышленности и на железнодорожном, автомобильном, водном транспорте.

Глава 1 написана кандидатом технических наук П. И. Бедой и А. И. Угаровым, гл. 2 и 3 — Ю. А. Глазковым, гл. 4 — кандидатом технических наук Г. С. Шелиховым, гл. 5 и 8 — кандидатом технических наук П. И. Бедой, гл. 6 и 7 — С. П. Луцько.

Глава 1

РОЛЬ И МЕСТО МЕТОДОВ ДЕФЕКТОСКОПИИ В ЭКСПЛУАТАЦИИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

§ 1.1. Задачи и значение эксплуатационной дефектоскопии

Успешному решению ответственных задач, стоящих перед советской военной и гражданской авиацией, способствует не только высокое мастерство летчиков, штурманов, инженеров, техников и механиков, но и замечательная авиационная техника. В настоящее время в эксплуатацию поступают новые самолеты и вертолеты различных типов, в которых воплощены последние достижения советской науки и промышленности. По своим летно-тактическим данным наши летательные аппараты превосходят лучшие образцы развитых капиталистических стран. Об этом свидетельствует, например, тот факт, что Советскому Союзу принадлежат многие мировые рекорды по максимальной скорости, грузоподъемности, скороподъемности, высоте полета и др.

Отечественная авиационная техника имеет высокий уровень эксплуатационной надежности, что обеспечивает безопасность полетов в сложных погодных условиях днем и ночью. Вместе с тем из-за значительных нагрузок, испытываемых самолетами и вертолетами, из-за работы ряда узлов в агрессивной среде, а также из-за длительных сроков эксплуатации может произойти снижение эксплуатационных свойств материала некоторых ответственных деталей, образование в них дефектов и их разрушение. Причинами поломок деталей могут быть также производственные дефекты материала, не обнаруженные на заводах-изготовителях.

Одним из мероприятий инженерно-авиационной службы (ИАС) по поддержанию летательных аппаратов (ЛА) в исправном состоянии является проведение дефектоскопического контроля их высоконагруженных деталей и узлов. Целью такого контроля является своевременное обнаружение трещин, коррозии, недопустимых изменений механических свойств материалов, а также нарушения нормального положения или разрушения внутренних

деталей узлов, агрегатов и приборов с тем, чтобы принять меры к устранению выявленных дефектов.

Применение средств дефектоскопии на различных этапах эксплуатации обеспечивает:

— полную выработку назначенных и межремонтных ресурсов авиационной техники и их обоснованное увеличение при сохранении заложенного уровня надежности;

— повышение достоверности определения технического состояния высоконагруженных деталей;

— уменьшение интенсивности отказов, предотвращение летных происшествий;

— слежение за развитием в процессе эксплуатации ЛА допустимых несплошностей материала и прогнозирование на этой основе работоспособности деталей и узлов;

— экономию материальных ценностей, уменьшение простоя ЛА, увеличение в единицу времени возможных самолето-вылетов путем предотвращения разрушения деталей и сокращения связанных с этим ремонтных работ.

Применяемые на каждом этапе развития авиации методы и средства дефектоскопии зависят от уровня развития науки и техники, состояния экономики страны, требований ИАС, вытекающих из обобщения случаев неисправностей авиационной техники, от физико-механических характеристик авиационных материалов, конструкции деталей и неразборных узлов, а также от уровня механических и температурных нагрузок, испытываемых ими.

Наличие трещин в нагруженных деталях самолетов с поршневыми двигателями до 50-х годов определялось в основном визуально. Для контроля деталей реактивных самолетов применения только визуального осмотра оказалось недостаточно. Потребовалось использовать инструментальные методы неразрушающего контроля (МНК) — капиллярный цветной, магнитопорошковый, ультразвуковой, токовихревой, позволяющие обнаруживать трещины усталости на ранней стадии их развития, пока они еще не видны глазом. С целью выявления отклеивания обшивки, например, от сотового наполнителя был внедрен импедансный акустический метод, а для определения состояния внутренних деталей — рентгеновский метод. Число методов и средств дефектоскопии, внедряемых в авиации, увеличивалось (рис. 1.1) по мере удлинения сроков эксплуатации реактивных самолетов, а также в связи с поступлением новых ЛА различных типов.

Объектами дефектоскопического контроля в эксплуатации являются стыковые узлы, рамы, балки, лонжероны крыла, центроплана, фюзеляжа и оперения; некоторые детали систем управления; клеевые соединения управляющих поверхностей и несущих винтов; валы, стаканы и лопасти воздушных винтов; стойки, авиационные колеса, детали подъемных механизмов и узлов навески шасси; рабочие лопатки и диски газовых турбин и компрессоров авиационных двигателей и др. Каждому типу ЛА присущи свои объекты контроля.

Объем эксплуатационного дефектоскопического контроля из года в год возрастает. Как правило, на длительно эксплуатирующихся ЛА он больше, чем на новых. Число деталей, которые проверяют на отсутствие трещин инструментальными средствами, на

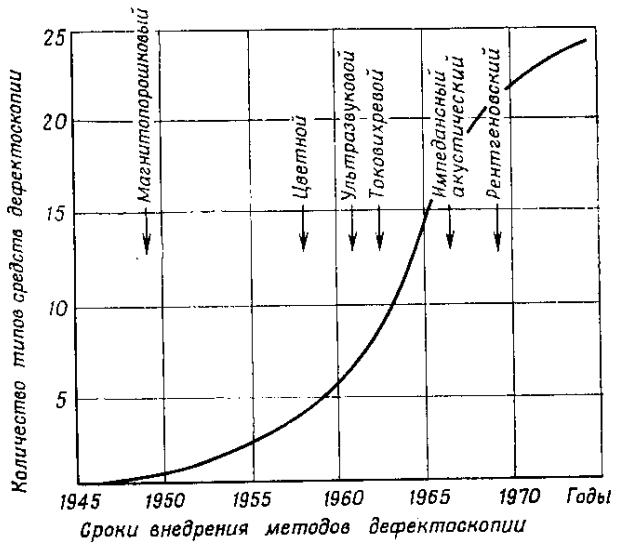


Рис. 1.1. Хронологическая последовательность внедрения методов и средств дефектоскопии в эксплуатацию (по годам)

одних ЛА составляет единицы, на других — несколько десятков. Для сравнения отметим, что при капитальном ремонте методами дефектоскопии проверяют по нескольку сот типов деталей на одном планере или двигателе.

Под контролем в условиях эксплуатации (под эксплуатационным контролем) следует понимать контроль, проводимый на аэродроме, с демонтажом или без демонтажа узлов или контроль по эксплуатационной документации в ремонтном предприятии или в ремонтной базе. Специфика применения средств дефектоскопии при капитально-восстановительном ремонте авиационной техники здесь не рассматривается.

Дефектоскопический контроль в эксплуатации бывает периодический плановый (при выполнении регламентных работ) и неплановый разовый (при целевых осмотрах). В некоторых случаях плановый контроль проводится через 10—25 ч налета (наработки). При проведении всех видов подготовок ЛА к полетам (при оперативных видах технического обслуживания самолетов и вертолетов) средства дефектоскопии в плановом порядке, за редкими исключениями, не применяют.

Большая роль принадлежит дефектоскопии при исследовании технического состояния лидеров, испытаниях ЛА на выносливость, а также при установлении причин отказов авиационной техники. В этих случаях число проверяемых деталей и глубина контроля существенно больше, чем периодического, и определяется специальными программами.

На современном этапе развития авиации возрастание роли эксплуатационной дефектоскопии является объективной закономерностью, в основе которой лежат следующие факторы:

— значительное усложнение авиационной техники, расширение боевых и транспортных возможностей одного ЛА, увеличение его стоимости в десятки раз по сравнению со стоимостью первых серийных реактивных самолетов; это приводит к тому, что количество самолетов, потребное для решения тех же задач, сокращается, а требования к надежности ЛА значительно возрастают;

— развитие тенденции к эксплуатации ЛА в зависимости от технического состояния; введение такой системы применительно к высоконагруженным деталям планера и двигателя потребует значительного увеличения объема и глубины инструментального контроля в эксплуатации.

§ 1.2. Дефекты сплошности материала деталей авиационной техники

Основной целью применения МНК в эксплуатации является выявление (а иногда и измерение) несплошности материала. Несплошности (неметаллические включения, субмикротрещины и др.) обычно содержит любой материал. Однако не всякая несплошность является дефектом, по которому следует деталь браковать или регулярно следить за его развитием до критических размеров, продолжая эксплуатацию детали.

Согласно ГОСТ 17102—71 дефектом называется каждое отдельное несоответствие продукции требованиям, установленным нормативной документацией. Дефекты классифицируют по ряду признаков: по степени локализации, по расположению относительно поверхности детали, по стадии возникновения, ориентировке относительно действующих напряжений, степени опасности и т. д.

По степени локализации несплошности бывают местные и распределенные по всему объему детали или по его значительной части.

По расположению относительно поверхности несплошности разделяют на поверхностные, подповерхностные (т. е. расположенные у поверхности в слое толщиной до 1 мм) и внутренние.

По стадии возникновения несплошности бывают производственно-технологические и эксплуатационные. Приближенная классификация по этому признаку, а также по виду несплошностей приведена в табл. 1.

Таблица 1

Дефекты сплошности металла

Производственно-технологические					Эксплуатационные
плавки и литья	проката и поковки	соединения металлов	термической и электрохимической обработки	механической обработки	
„Горячие" и „холодные" трещины. Газовые раковины. Усадочные раковины. Рыхлоты. Пористость. Песчаные и шлаковые раковины. Утяжины. Плены. Неметаллические включения	Волосовины. Рванины. Закаты. Расслоения. Флокены. Внутренние разрывы. Трещины. Плены	„Горячие" и „холодные" трещины по границе сварного шва, в наплавленном металле и в зоне термического влияния. Непровары. Пористость. Раковины. Шлаковые включения. Непропаи. Непроклеи	Закалочные трещины. „Водородные" трещины. Растравливание материала	Шлифовочные трещины. Отделочные трещины. Надрывы при холодной деформации	Усталостные трещины. Трещины ползучести. Коррозионно-усталостные трещины. Трещины от однократной нагрузки. Трещины от структурных напряжений. Коррозия (точечная, язвенная, межкристаллитная). Термические трещины. Трещины термической усталости

По ориентировке относительно действующих напряжений дефекты делят на поперечные и продольные.

По степени опасности согласно ГОСТ 17102—71 дефекты с целью выбора методов и средств контроля относят к критическим, значительным и малозначительным. При этом учитывают характер и размеры дефектов, место их расположения на детали, чувствительность материала к концентратору напряжений, особенности конструкции и назначение детали, характер нагружения детали (статическое, повторностатическое, динамическое), температуру, коррозионную агрессивность среды и т. д.

К критическим относят дефекты, при наличии которых дальнейшее использование детали недопустимо по соображениям безопасности полета или практически невозможно. Это трещины любых размеров, расположенные в местах, являющихся и при отсутствии несплошности концентраторами напряжений (по галтелям, в резьбе и в узлах колебаний детали), а также поперек действующих напряжений в стойках шасси, дисках и лопатках роторов газовых турбин и компрессоров, в лопастях и валах воздушных винтов, балках крыла в местах стыковки с фюзеляжем, сквозные трещины в топливных баках и т. д.

К значительным относят дефекты, которые существенно влияют на использование детали по назначению и (или) на ее долговечность, но не являются критическими. Сюда относятся очаги коррозии в баллонах кислородной и противопожарной систем и в трубопроводах, трещины в лопатках роторов турбин и компрессоров, идущие вдоль действующих напряжений, заковы в кронштейнах, тягах, рычагах, качалках систем управления, лонжеронах, шпангоутах, в авиационных колесах и т. д.

К малозначительным относят дефекты, которые не оказывают существенного влияния на использование детали по назначению и (или) на ее долговечность, например плены, небольшие неусталостные трещины в лопатках спрямляющих и сопловых аппаратов, трещины в тормозных дисках, очаги коррозии и небольшие трещины в обшивке, неметаллические включения в малонапряженных местах кронштейнов, качалок и т. д.

Степень опасности дефектов, нормы на браковку для каждой нагруженной детали устанавливает генеральный (главный) конструктор.

При определении степени опасности несплошности с целью выбора методов, средств и приемов контроля участки детали (или деталь полностью) относят к группам по напряженности. Например, выделяют две группы напряженности.

К первой группе можно отнести детали, в которых действующие при работе напряжения равномерно распределены. Это пружины, клапаны, поршневые пальцы, лопатки сопловых и спрямляющих аппаратов, тяги, прямолинейные участки трубопроводов и т. д. В этой группе одинаковые несплошности, расположенные в разных местах, оказывают практически одинаковое влияние на

прочность детали. Такие детали проверяют МНК по всей поверхности или по всему объему.

Ко второй группе можно отнести детали, при работе которых напряжения концентрируются в локальных зонах в связи с кон-

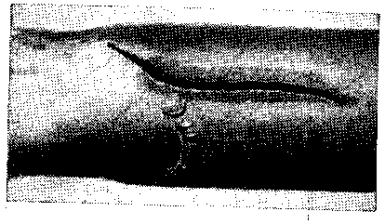


Рис. 1.2. Закалочная трещина в тяге вертолета (выявлена магнитопорошковым методом)

структивной формой или характером нагрузок. Это лопатки роторов авиационных двигателей, валы и втулки с резьбой, шлицами и фланцами, зубчатые колеса, болты, лонжероны, балки, некото-

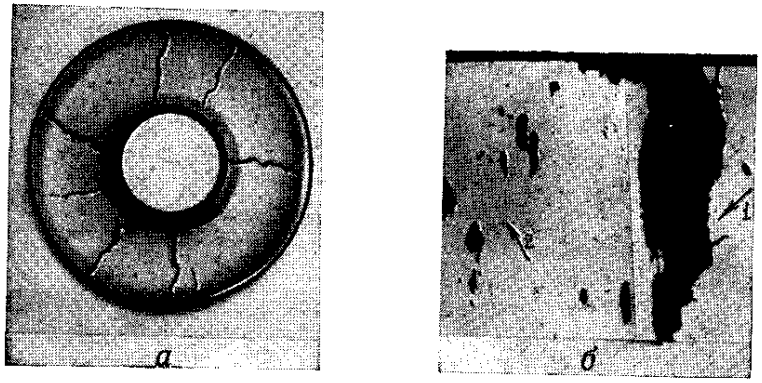
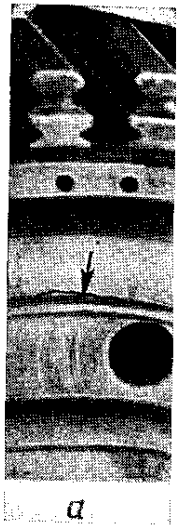


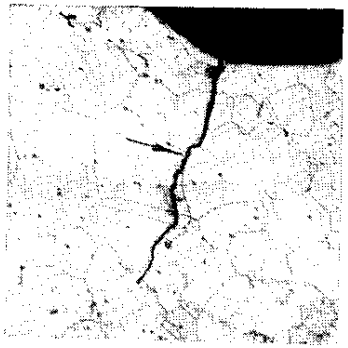
Рис. 1.3. Термические трещины в гильзе рабочей форсунки, возникшие из-за пористости, снизившей прочность материала (выявлены методом цветной дефектоскопии; поры образовались в результате растравливания волокон материала при нарушении технологии хромирования):

а — вид на торец гильзы; *б* — трещина (*1*) и поры (*2*) на микрошлифе

рые детали шасси. Для них степень опасности каждой несплошности определяется близостью ее к концентратору напряжений.

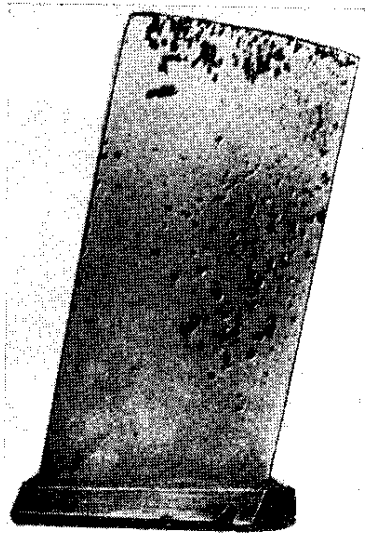


а

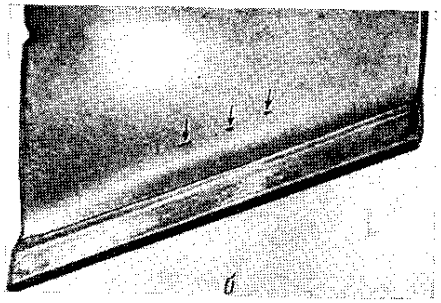


б

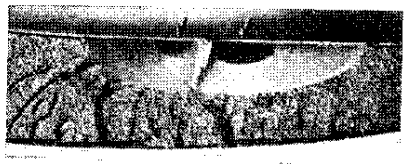
Рис. 1.4. Усталостная трещина в диске турбины (выявлена методом цветной дефектоскопии):
а — вид на поверхности; *б* — вид на микрошлифе



а



б

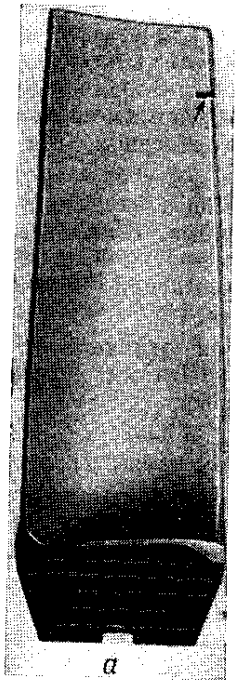


в

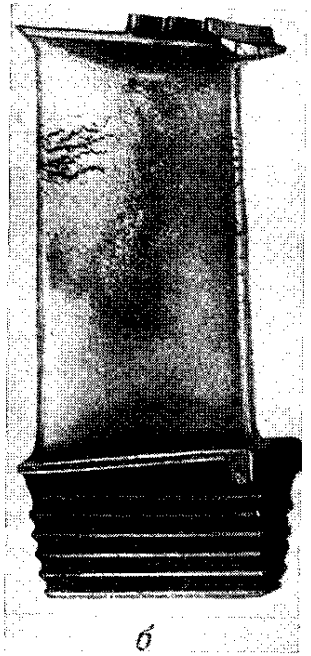
Рис. 1.5. Эксплуатационные дефекты в рабочих лопатках компрессора:
а — очаги язвенной коррозии (выявлены методом цветной дефектоскопии); *б* — усталостные трещины (выявлены магнитопорошковым методом); *в* — излом лопатки, очагом разрушения которой явились усталостные трещины, пропущенные при ремонте (указаны стрелками)

Влияние одинаковых несплошностей на разных участках различно. Для этих деталей при назначении технологии контроля устанавливают зоны повышенного внимания.

Дефекты различного происхождения по-разному влияют на прочность детали каждой группы. Так, например, волосовина длиной 3—8 мм, глубиной 0,05—0,3 мм при ее расположении перпен-



а



б

Рис. 1.6. Эксплуатационные дефекты в рабочих лопатках турбин (выявлены методом цветной дефектоскопии):
а — усталостная трещина; *б* — трещины ползучести

дикулярно (или близко к этому) к максимальным растягивающим напряжениям в деталях второй группы не допускается, так как снижает предел выносливости в отдельных случаях до 50%. Наличие шлифовочных трещин глубиной 0,1—0,2 мм снижает предел выносливости стали 18ХНВА в 3 раза, твердой шарикоподшипниковой стали — в 5—10 раз.

Усталостные трещины на деталях второй группы являются критическими дефектами. На рис. 1.2—1.6 приведены, а в гл. 3—6

описаны некоторые производственные и эксплуатационные дефекты, обнаруженные в деталях авиационной техники МНК. Невыявленные критические и значительные дефекты могут явиться причиной разрушения деталей в эксплуатации.

§ 1.3. Сравнительная характеристика и области применения методов дефектоскопии в эксплуатации

Дефектоскопический контроль в условиях эксплуатации имеет особенности, из-за которых невозможно, за редким исключением, для его проведения использовать методики, применяемые для контроля деталей при изготовлении. Эти особенности состоят в следующем:

— контролю подвергают детали, бывшие в эксплуатации, на поверхности которых имеются лакокрасочные, силикатные, эмалевые и другие покрытия, окисные пленки, различные отложения (нагар, загрязнения), механические повреждения (забоины, риски), коррозионно-эрозионные повреждения;

— на одном самолете проверяют детали, отличающиеся материалами, из которых они изготовлены, покрытиями, конструкцией, допустимыми размерами и видами дефектов;

— выявлению подлежат несплошности преимущественно эксплуатационного происхождения, в основном трещины и коррозия;

— зоны, в которых возникают эксплуатационные дефекты, как правило, становятся известны до проведения контроля, в связи с чем он является локальным;

— проверяемые детали находятся в неразъемных узлах конструкции, иногда в труднодоступных местах;

— работы проводят часто на открытых стоянках аэродромов, в различных климатических и погодных условиях.

По сравнению с контролем в промышленности перед контролем в эксплуатации необходимо проводить подготовительные работы иногда большой трудоемкости — частичный демонтаж, удаление защитных покрытий, загрязнений и т. д.

Технические средства эксплуатационного контроля должны удовлетворять следующим требованиям:

— универсальность применения;

— портативность, малая масса, транспортабельность;

— простота в обращении, высокая надежность;

— автономность питания электрической энергией и возможность питания от аэродромных источников энергии;

— достаточная механическая защита и приспособленность для работы на открытом воздухе, при положительной и отрицательной температуре;

— наличие специальных приспособлений, позволяющих проводить контроль деталей, расположенных в труднодоступных местах.

Применяемые в эксплуатации современные средства контроля в основном удовлетворяют перечисленным требованиям.

При осмотрах техники на аэродромах ставится задача обеспечить надежную работу изделия на период до очередной проверки. Поэтому требования к чувствительности средств, применяемых в условиях эксплуатации, зачастую ниже, чем при контроле на заводе-изготовителе или в ремонтном предприятии. Это облегчает расшифровку результатов контроля и исключает возможность перебраковки.

В настоящее время в эксплуатации для контроля деталей ЛА применяют семь МНК: магнитопорошковый, капиллярный цветной, ультразвуковой, импедансный акустический, токовихревой, оптико-визуальный и рентгеновский. Все методы, за исключением оптико-визуального, являются методами непрямого, косвенного контроля. Рентгеновский метод специалисты эксплуатирующих подразделений не применяют. Контроль рентгеновским методом выполняют бригады промышленности или специальных подразделений авиации.

Разнообразие используемых в эксплуатации методов объясняется широтой стоящих задач и ограниченными техническими возможностями каждого из методов. Предельно достижимая чувствительность МНК при применении их в эксплуатации указана в табл. 2.

Магнитопорошковый метод является основным для контроля деталей из магнитных сталей, позволяющим выявить поверхностные и подповерхностные дефекты. Он отличается высокой чувствительностью и достоверностью, простотой и универсальностью методик контроля (по результатам контроля можно точно установить место и протяженность дефекта), позволяет фотографировать рисунок дефекта или снимать дефектограмму. К недостаткам метода относятся: необходимость удаления защитных покрытий толщиной более 0,03 мм; возможность попадания частиц магнитного порошка в подшипники, в прецезионные сочленения; сложность размагничивания некоторых узлов и в случае неполного размагничивания деталей возможность их влияния на датчики курсовых индикаторов и на износ трущихся сочленений; сложность в некоторых случаях расшифровки результатов контроля.

Цветной метод применяют для проверки деталей в основном из немагнитных материалов с целью выявления открытых поверхностных дефектов. Он позволяет контролировать детали сложной формы сразу по всей поверхности, отличается высокой чувствительностью и разрешающей способностью, наглядностью результатов, по которым можно установить точно место расположения дефекта, его протяженность, а часто и вид, универсальностью основных технологических операций при контроле различных по форме деталей, позволяет снимать дефектограммы или фотогра-

Таблица 2

Предельно достижимая чувствительность МНК при применении их в эксплуатации

Методы неразрушающего контроля (МНК)	Минимальные размеры обнаруживаемых трещин, мм		
	ширина раскрытия у выхода на поверхность	глубина	длина
Магнитопорошковый с применением магнитной суспензии	0,001	0,1	0,5—1
Капиллярный цветной с применением составов «К» и «М»	0,001—0,05	0,1	0,1—0,3
Ультразвуковой:			
— с использованием поверхностных волн (на кромках лопаток)	0,001	0,3	—
— с использованием нормальных волн	0,001	0,1	10
Акустический импедансный *	—	—	—
Вихревых токов с применением дефектоскопа ВДЦ-1М	0,001	0,3—0,5	1,5—5
Оптико-визуальный:			
— глазом	0,1	—	2—3
— с применением оптических приборов	0,01—0,1	—	2—3
Рентгеновский	0,1	1,5—3% от просвечиваемой толщины	2—3

* Позволяет обнаруживать непроклеи площадью 25 мм².

фировать рисунок выявленных дефектов. К недостаткам метода относятся: необходимость удаления защитных покрытий и загрязнений, большая трудоемкость контроля, большая длительность процесса контроля (1,5—4 ч до выявления дефектов); низкая достоверность при отрицательных температурах; низкая достоверность контроля стальных и магниевых деталей (без специальных способов очистки); малый контраст рисунка при контроле деталей с темной поверхностью; чувствительность к точности выполнения технологических операций. Применение цветного метода на аэродромах ограничено.

Ультразвуковой импульсный метод находит все более широкое применение при эксплуатационном контроле. Им проверяют лопатки турбин и компрессоров, диски компрессоров, валы, лопасти воздушных винтов, рамы, скобы и др. Метод позволяет обнаруживать с высокой чувствительностью поверхностные, подповерхностные и внутренние дефекты, имеет высокую производительность. Недостатками этого метода являются: необходимость разработки специальных методик, а зачастую и искателей для каждого типа деталей и материала; относительная сложность расшифровки результатов контроля, определения места и вида дефекта; относительная трудность, а в ряде случаев невозможность контроля деталей сложной формы; возможность контроля деталей только с высокой чистотой поверхности (не менее ▽ 5); отсутствие наглядности результатов контроля.

Акустический импедансный метод применяют для обнаружения непроклеев между обшивкой и сотовым наполнителем лопастей несущих винтов вертолетов, интерцепторов, закрылков, руля поворота и крыльевых прижимных щитков. Другие рассматриваемые в книге методы дефектоскопии решать подобные задачи не могут.

Метод вихревых токов позволяет обнаруживать только поверхностные и подповерхностные дефекты. Используется в эксплуатации в основном для контроля деталей из немагнитных материалов: лопаток турбин и компрессоров, лопастей воздушных винтов, барабанов и реборд авиационных колес, деталей систем управления, деталей силового набора, стыковых узлов. Для контроля не нужно удалять защитные покрытия и не обязателен механический контакт датчика с проверяемой деталью. Метод вихревых токов по сравнению с цветным методом позволяет выявлять малораскрытые трещины, дефекты, перекрытые металлическими «мостиками», отличается незначительной трудоемкостью. Недостатками метода являются: зависимость чувствительности от размеров датчиков, в связи с чем она ниже, чем чувствительность (по длине и глубине дефекта) магнитного, цветного и ультразвукового методов; отсутствие наглядности результатов контроля; высокая трудоемкость ручного контроля больших поверхностей; сложность контроля деталей из магнитных материалов из-за значительного влияния на его результаты магнитной неоднородности стали.

Оптико-визуальный метод по сравнению с другими характеризуется низкой чувствительностью и достоверностью при определении дефектов типа несплошности. Он позволяет обнаруживать большие раскрытые трещины (шириной 0,1—0,01 мм), механический износ, поверхностную коррозию и эрозионные повреждения, пробоины, обрывы, остаточную деформацию, нарушения сплошности защитных покрытий, наличие на деталях отложений и загрязнений, течи в системах и т. д.

Для контроля деталей, расположенных в труднодоступных местах, наиболее пригодны оптико-визуальный, токовихревой и ультразвуковой методы.

Рентгеновский метод, применяемый в эксплуатации при целевых осмотрах и расследовании причин отказов на авиационной технике, позволяет оценить взаимное расположение и целостность внутренних деталей в узлах и агрегатах, например заделку тросов, наконечников шлангов, техническое состояние переключателей, штепсельных разъемов, кранов, анероидных приборов, силовых узлов и т. д. Им также выявляют коррозию на скрытой поверхности баллонов, элементов силового набора, раскрытые трещины, внутренние несплошности в виде рыхлот, непроваров,

наличие посторонних предметов. Недостатками метода является необходимость специальной защиты людей от облучения и относительная громоздкость аппаратуры.

§ 1.4. Эффективность дефектоскопического контроля авиационной техники

Эффективность контроля в основном определяется следующими показателями:

— достоверностью результатов;

— длительностью выполнения контроля и трудозатратами;

— отсутствием отрицательного влияния контроля на эксплуатационные свойства деталей или систем ЛА (на коррозионную стойкость и прочность, на датчики курсовых индикаторов и т. д.);

— периодичностью контроля;

— уровнем подготовки дефектоскопистов;

— дефектоскопической технологичностью ЛА.

Периодичность контроля устанавливают, исходя из обеспечения заданной надежности. Она согласуется с планом технической эксплуатации ЛА данного типа. Исходными данными для определения периодичности дефектоскопического контроля деталей являются: фактические нагрузки, испытываемые данной деталью; скорость развития трещин; чувствительность и достоверность метода (средства) контроля; уровень подготовки дефектоскопистов.

Уровень подготовки дефектоскопистов—один из главных факторов, обеспечивающих эффективное применение МНК. Роль этого фактора определяется тем, что дефектоскопический контроль в эксплуатации является ручным. На ЛА практически нет возможности применять автоматизированные средства дефектоскопии (за исключением средств встроенного дефектоскопического контроля, которые пока используются мало). Чтобы максимально снизить влияние субъективных факторов на результаты контроля, дефектоскопист должен иметь:

— хорошую теоретическую подготовку по дефектоскопии, предполагающую знание физических основ применяемых методов, их технических возможностей, преимуществ и недостатков, областей применения при эксплуатации авиационной техники, конструкции и правил эксплуатации дефектоскопов;

— достаточную подготовку по конструкции планера и двигателя, предполагающую знание критических мест ответственных деталей, нагрузок, действующих на них, структуры и свойств их материалов, способов обработки при изготовлении, характера дефектов, подлежащих обнаружению, методов технической эксплуатации, правил техники безопасности;

— большой практический опыт проведения дефектоскопического контроля применяемыми в авиации методами, включающий навыки в настройке, проверке и применении дефектоскопических приборов и материалов, знание частных методик контроля деталей, умение правильно расшифровывать результаты контроля (выделять показания при наличии дефектов от ложных показаний), правильно выбирать дублирующий метод, принимать решение по выявленным дефектам.

Удовлетворять этим требованиям может человек, регулярно выполняющий дефектоскопический контроль.

Эффективный контроль ЛА в ряде случаев бывает невозможным из-за того, что конструкция ЛА или отдельных узлов не согласована с возможностями имеющихся МНК — она дефектоскопически нетехнологична.

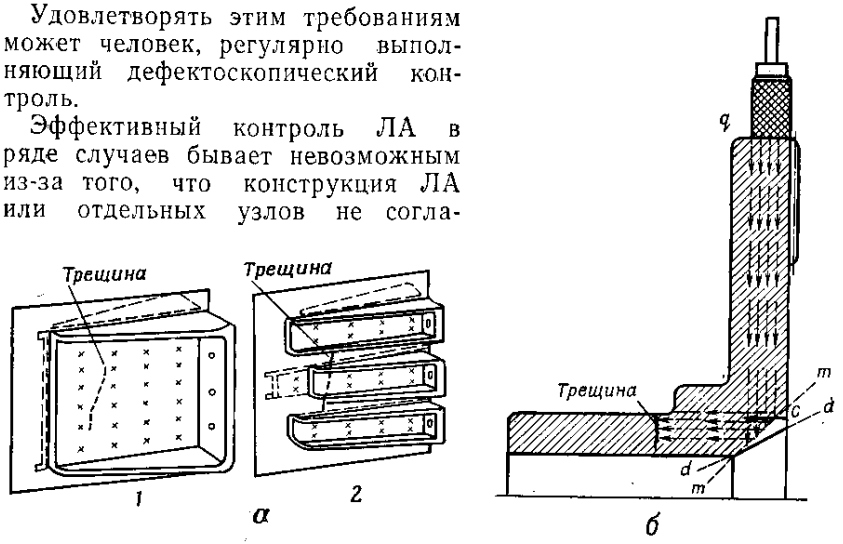


Рис. 1.7. Дефектоскопически нетехнологичная (*а, 1*; *б, d—d*) и технологичная (*а, 2*; *б, m—m*) конструкция элементов:

а, 1 — трещины в панели не могут быть выявлены; *а, 2* — трещины в панели могут быть выявлены токовихревым дефектоскопом или визуально; *б, d — d* — угол фаски полого вала не обеспечивает контроля ультразвуком, вводимым через доступную поверхность *q* фланца; контроль проводится через зону *C*, что требует выполнения демонтажных работ, так как эта зона закрыта; *б, m — m* — наклон фаски под углом 45° позволяет выявлять трещину при вводе ультразвука через зону *q*

Под дефектоскопической технологичностью понимают совокупность свойств, придаваемых конструкции ЛА и ее деталям на этапах проектирования, изготовления и доводки и обеспечивающих возможность обоснованного дефектоскопического контроля высоконагруженных деталей и узлов в эксплуатации. Эти свойства предусматривают:

— приспособленность проверяемых деталей и узлов (по свойствам материалов, конструкции) к контролю одним методом или комплексом методов;

— инструментальную доступность контролируемых мест на ЛА при минимуме демонтажных работ и затрат времени для проведения контроля.

Примеры дефектоскопически технологичного и нетехнологичного выполнения элементов конструкции показаны на рис. 1.7.

Необходимым условием повышения эффективности МНК является совершенствование средств контроля. По данным зарубеж-

ных специалистов, перспективными являются контроль радиационными методами, применение метода акустической эмиссии, гуммированных магнитных суспензий для контроля малодоступных зон, магнитно-люминесцентных порошков, цветных магнитных паст; материалов для цветной дефектоскопии длительного хранения при отрицательных температурах с большой скоростью проявления дефекта, материалов для цветной дефектоскопии в аэрозольном варианте, комплектов химических очистителей поверхности деталей, более совершенных универсальных токовихревых и ультразвуковых дефектоскопов, оснащенных специальными механизмами для контроля деталей, расположенных в труднодоступных местах, дефектоскопов, основанных на анализе параметров собственных колебаний деталей; комплектов управляемых оптических приборов и др. В перспективных ЛА значительный объем дефектоскопического контроля должен выполняться системами встроенного (бортового) контроля состояния материала деталей.

Глава 2

ОПТИКО-ВИЗУАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ

§ 2.1. Основы оптико-визуального контроля

Оптико-визуальный (ОВ) контроль основан на использовании законов геометрической оптики, т. е. законов распространения, отражения и преломления лучей света в системах оптических приборов. В понятие «свет» включают электромагнитное излучение с длиной волны от 400 до 750 нм, воспринимаемое человеческим глазом, а также излучение в инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра. ОВ контроль проводится в основном в видимом свете. Оптические системы приборов образуют изображение осматриваемого объекта и передают его в глаз человека.

Видимость любого предмета, помимо субъективных особенностей реакции зрения на предмет, определяется его объективными свойствами: контрастом, яркостью, угловыми размерами, резкостью его контуров, а также продолжительностью ви́дения. Каждому из указанных свойств соответствует свой абсолютный порог, ниже которого предмет не может быть виден, сколь бы благоприятны ни были условия наблюдения по остальным факторам. Однако наиболее существенно влияют на видимость предметов два фактора: контраст и угловые размеры.

Минимальный различаемый глазом яркостный контраст предмета и фона называется порогом контрастной чувствительности зрения. Для большинства людей он составляет 1—2%. При осмотре деталей этот порог для сочетания дефект — поверхность детали выше и составляет 5% и более. Это объясняется низкой яркостью дефектов и поверхности детали, малыми угловыми размерами дефектов, наличием бликов, а также воздействием других мешающих факторов. Практически контраст дефектов, например трещин на деталях, составляет от 0—1% до 15—20%. Следовательно, некоторые дефекты имеют контраст меньше реального порогового значения. Они не могут быть обнаружены глазом.

Однако даже при большом контрасте и достаточной освещенности глаз может различать только те элементы рассматриваемого предмета, угловой размер которых выше некоторой величины. Эта

величина, называемая **остротой зрения**, для нормального глаза в оптимальных условиях осмотра равна 1′. Средняя острота зрения людей составляет 2—4′. При остроте зрения 2′ на расстоянии 250 мм глаз может различать фигуры размером не менее 0,15 мм.

При контроле с помощью оптических приборов происходит увеличение углового размера рассматриваемого объекта. Острота зрения увеличивается во столько раз, во сколько увеличивает оптический прибор. Это позволяет видеть мелкие объекты наблюдения, размеры которых находятся за пределами границы видимости невооруженного глаза. Кроме того, приборы, в которых лучи света изменяют направление, позволяют осматривать детали и поверхности элементов конструкций, скрытые близлежащими деталями и не доступные прямому наблюдению.

С ростом увеличения оптических приборов существенно сокращается поле зрения и уменьшается глубина резкости, быстрее наступает усталость человека, а также снижается производительность и достоверность контроля. Поэтому для осмотра деталей в основном применяют оптические приборы увеличением не более 20—30.

Дефекты даже относительно больших размеров, не видимые невооруженным глазом из-за малого их контраста с фоном, при использовании оптических приборов также не обнаруживаются.

Оптические приборы применяют:

— для поиска поверхностных дефектов на деталях при ОВ контроле, а также для обнаружения мелких трещин при цветном и магнитопорошковом контроле;

— для поиска мест деформации и разрушения деталей и силовых элементов авиационных конструкций;

— для определения вида, анализа характера, оценки степени опасности поверхностных дефектов, обнаруженных при контроле деталей ультразвуковым, токовихревым, цветным и магнитопорошковым методами;

— для оценки отложений нагара, поиска загрязнений, течей, обнаружения посторонних предметов внутри закрытых конструкций.

Оптические приборы по назначению разделяют на три группы:

1. Приборы для контроля близко расположенных объектов (лупы, микроскопы).

2. Приборы для контроля удаленных объектов (телескопические лупы, бинокли).

3. Приборы для контроля скрытых объектов и осмотра внутренних поверхностей отверстий, полых деталей и закрытых конструкций (эндоскопы, перископы, бороскопы и др.).

Бинокулярное зрение предпочтительнее при ОВ контроле, чем монокулярное, особенно при контроле деталей и изделий сложной формы. Оно обеспечивает более правильное восприятие пространства, объема и формы рассматриваемых объектов, позволяет точнее оценивать их взаимное расположение. При бинокулярном зрении наблюдатель обладает более высокой чувствительностью к различию яркости объектов. Осмотр двумя глазами менее утомителен, чем одним, вследствие защиты глаз от попадания постороннего света. Поэтому более высокой эффективности достигают при ОВ контроле с применением бинокулярных приборов, обеспечивающих стереоскопический эффект при осмотре деталей.

§ 2.2. Контроль близко расположенных объектов

При ОВ контроле близко расположенных объектов применяют лупы и микроскопы. Для получения увеличенного изображения лупу помещают у поверхности детали *1* (рис. 2.1) так, чтобы расстояние между ними было немного меньше фокусного расстояния лупы. Наблюдатель при этом видит увеличенное прямое мнимое изображение *2* детали, которое получается на расстоянии наилучшего зрения (D=250 мм), т. е. на наименьшем расстоянии, на котором нормальный глаз без напряжения отчетливо видит предмет. Увеличение лупы приближенно равно: $\Gamma_л = D/f = 250/f$.

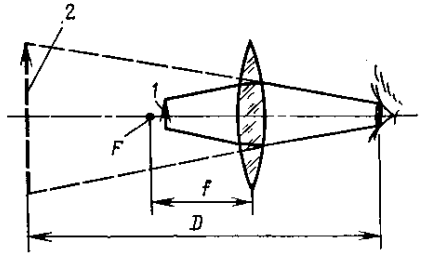


Рис. 2.1. Схема осмотра с применением лупы:

1 — объект контроля; *2* — мнимое изображение объекта; *F* — фокус лупы; *f* — фокусное расстояние лупы

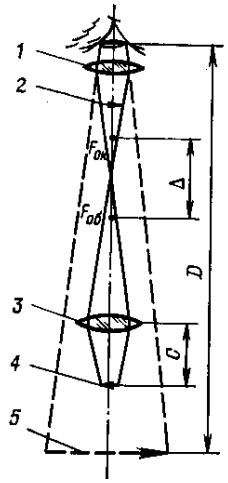


Рис. 2.2. Оптическая схема монокулярного микроскопа:

1 — окуляр; *2* — обратное изображение объекта; *3* — объектив; *4* — объект контроля; *5* — мнимое увеличенное изображение объекта; *C* — рабочее расстояние; *D* — расстояние наилучшего зрения

С ростом увеличения лупы улучшается **разрешающая способность зрения**, под которой понимают способность глаза различать раздельно близко расположенные точки, линии или другие фигуры. Однако из-за существенного сокращения поля зрения при больших увеличениях, уменьшения глубины резкости и других факторов контроль деталей в основном проводят с помощью луп увеличением от 2 до 10.

Оптическая система микроскопа состоит из объектива *3* (рис. 2.2) и окуляра *1*, оптические оси которых совпадают. Полное увеличение микроскопа $\Gamma_м$ определяется как произведение

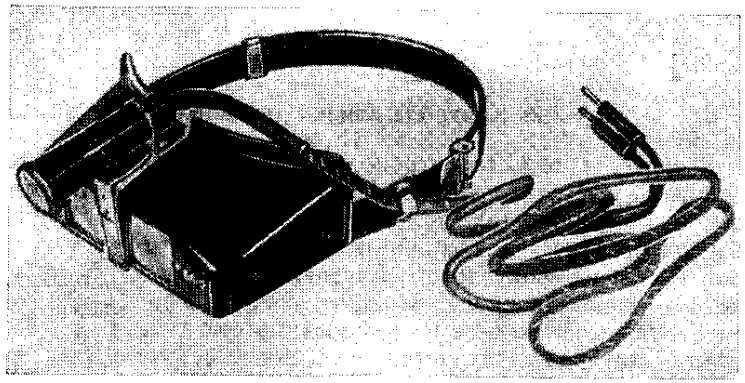


Рис. 2.3. Бинокулярная налобная лупа БЛ-2

увеличения объектива $\Gamma_{об}$ и увеличения окуляра $\Gamma_{ок}$ как простой лупы:

$$\Gamma_м = \Gamma_{об}\Gamma_{ок},$$

где $\Gamma_{об} = \Delta/f_{об}$;

$\Gamma_{ок} = D/f_{ок}$;

Δ — расстояние от заднего фокуса объектива до переднего фокуса окуляра, мм.

Для контроля деталей применяют микроскопы с увеличением в пределах от 8 до 40—50. Несмотря на незначительное различие увеличения микроскопов и луп качество изображения, образуемого оптической системой микроскопов, выше. Поэтому ОВ контроль деталей с применением микроскопов при прочих равных условиях более эффективен.

Для общего осмотра и поиска крупных дефектов (поверхностных коррозионных и эрозионных повреждений, забоин, пор и т. д.) на демонтированных деталях и в конструкции ЛА применяют обзорные лупы. Они имеют малое увеличение и большое поле врения.

Обзорная складная лупа ЛПК-471 состоит из линзы с увеличением 1,25—2, заключенной в оправу с ручкой. Световой диаметр лупы 78 мм, фокусное расстояние 200 мм. Работа с ней не утомляет глаз. Осмотр можно проводить двумя глазами при расстоянии между ними и лупой до 500—600 мм и между лупой и деталью до 140—150 мм.

Бинокулярные налобные лупы БЛ-1 и БЛ-2 (рис. 2.3) имеют увеличение 1,25—2 и образуют стереоскопическое изображение рассматриваемого объекта. С помощью обода лупы могут кре-

питься на голове. На лупе БЛ-2 установлен осветитель. Эта лупа позволяет осматривать детали в условиях плохой освещенности.

Для осмотра резьбы, для поиска трещин в обшивке вокруг заклепок, забоин на лопатках I ступени ротора компрессора и других дефектов на малых участках поверхности применяют про-

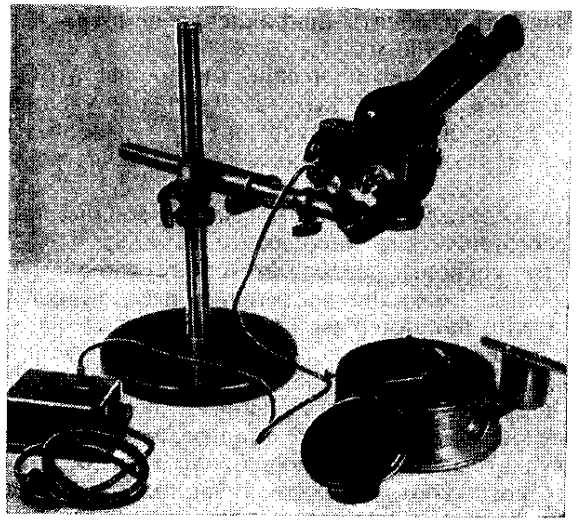


Рис. 2.4. Бинокулярный микроскоп МБС-2

стые однолинзовые складные карманные лупы ЛП1 с увеличением 2,5; 4 и 7. Для поиска таких же повреждений, а также для определения вида и анализа характера дефектов, обнаруженных цветным, магнитопорошковым, ультразвуковым или токовихревым методами, используют складные карманные лупы, склеенные из трех линз, — ЛА3 с увеличением 6 и 10. Эти лупы по сравнению с простыми дают изображение более высокого качества.

Микроскопы в основном используют в стационарных условиях для определения вида поверхностных дефектов, обнаруженных на демонтированных деталях каким-либо методом дефектоскопии. Однако в ряде случаев, когда, например, зона контроля очень мала, их применяют также для поиска дефектов.

Бинокулярный микроскоп БМ-51-2 предназначен для ОВ контроля небольших деталей диаметром до 100 мм. Он имеет увеличение 8,75, поле зрения 25 мм, рабочее расстояние $C = 140$ мм (т. е. расстояние от объектива микроскопа до объекта контроля, см. рис. 2.2). Оптическая система микроскопа дает возможность наблюдать прямое стереоскопическое изображение объекта. Прибор удобен при работе стоя.

Бинокулярный стереоскопический микроскоп МБС-2 (рис. 2.4) имеет диапазон увеличений от 3,5 до 88. Увеличение изменяется

ступенчато. Оптическая система микроскопа позволяет получать прямое с высокой стереоскопичностью изображение контролируемого объекта. Поле зрения микроскопа изменяется от 2,6 до 42 мм в зависимости от увеличения. Рабочее расстояние при всех увеличениях постоянное — 64 мм. Микроскоп имеет осветитель. Оптическая головка прибора установлена на универсальном штативе, который позволяет изменять направление осмотра и осматривать детали диаметром до 400 мм.

Бинокулярный стереоскопический микроскоп МБС-3 по конструкции аналогичен прибору МБС-2. Диапазон увеличений его по сравнению с последним расширен до 100. Рабочее расстояние микроскопа при всех увеличениях 109 мм, качество изображения улучшено.

При осмотре деталей могут быть использованы также бинокулярные стереоскопические микроскопы МБС-9, МБС-200 и др.

Лупы и микроскопы позволяют обнаруживать относительно крупные дефекты, имеющие достаточно высокий контраст на поверхности детали, например раскрытые трещины различного происхождения, поверхностные коррозионные и эрозионные повреждения, забоины, открытые раковины, риски, надиры трущихся поверхностей и другие дефекты материала деталей, лакокрасочных и гальванических покрытий. При анализе характера дефектов, обнаруженных цветным, магнитопорошковым и другими методами, эти приборы позволяют отличать трещины от рисок, заусенцев, зон наклепа, сколов окисной пленки, нитевидных загрязнений (смолистых отложений, волокон ветоши и т. д.).

§ 2.3. Контроль удаленных объектов

Телескопическая система приборов (телескопических луп и биноклей) для контроля удаленных объектов состоит из двух частей — объектива и окуляра. Она аналогична оптической системе микроскопа (см. рис. 2.2), но в отличие от нее в телескопической системе задний фокус объектива совмещен с передним фокусом окуляра, а передний фокус объектива и задний фокус окуляра находятся в бесконечности. Назначение объектива — давать действительное изображение рассматриваемого объекта. При значительном удалении объекта лучи, исходящие из любой его точки, практически параллельны. Действительное, обратное и уменьшенное изображение объекта получается в фокальной плоскости объектива и в фокальной плоскости окуляра. В окуляр наблюдатель видит обратное мнимое, как правило увеличенное, изображение удаленного объекта.

Увеличение простейшей телескопической системы определяется по формуле

$$\Gamma_{т.с} = \frac{f_{об}}{f_{ок}}.$$

Для получения прямого изображения объекта в телескопических приборах применяют оборачивающие системы, состоящие из

одной или из нескольких призм или линз. Если оборачивающая система имеет линейное увеличение w, то общее увеличение прибора

$$\Gamma_{т.с} = w\frac{f_{об}}{f_{ок}}.$$

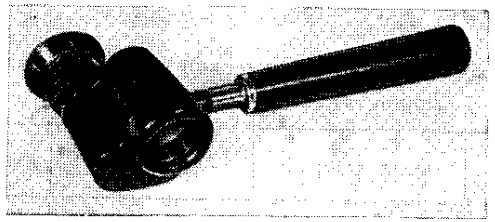


Рис. 2.5. Телескопическая лупа ЛПШ-474 (полевой вариант)

Если телескопическая лупа образуется комбинацией бинокля (или одной его оптической трубки) с насадкой, увеличение такой лупы

$$\Gamma_{т.л} = \frac{250}{f'_н}\Gamma_{т.с},$$

где $f'_н$ — фокусное расстояние насадки;

$\Gamma_{т.с}$ — увеличение телескопической системы бинокля.

Телескопическая лупа является многоцелевым прибором. Лупа, установленная на штатив, используется как монокулярный микроскоп. Лупа на рукоятке применяется для осмотра удаленных объектов. Для контроля в эксплуатации наиболее широкое распространение получили телескопические лупы ЛПШ-474 и ТЛА.

Телескопическая лупа ЛПШ-474 (рис. 2.5) представляет собой призменный монокуляр с увеличением 4, на объектив которого надевают сменные насадки, позволяющие изменять общее увеличение лупы, диаметр поля зрения и рабочее расстояние (табл. 3).

Таблица 3

Технические данные оптической системы лупы ЛПШ-474

Увеличение насадки	Увеличение лупы	Диаметр поля зрения, мм	Рабочее расстояние лупы, мм
Без насадки	4	195 и более	1050 и более
0,25	1	95—375	570—2250
0,5	2	60—110	365—615
1	4	35—50	220—276
2,5	10	18	94—104
5	20	8,8	48—51
10	40	4,4	25

Эту лупу выпускают в двух вариантах. В лабораторном варианте она крепится на настольном штативе, а в полевом — на съемной ручке.

Телескопическая лупа ТЛА по своей конструкции аналогична лабораторному варианту лупы ЛПШ-474. Это монокуляр с увеличением 6 или 8, на объектив которого также надевают сменные насадки (табл. 4).

Таблица 4

Технические данные оптической системы лупы ТЛА

(монокуляр 8-кратного увеличения)

Увеличение насадки	Общее увеличение	Диаметр поля зрения, мм	Рабочее расстояние, мм
Без насадки	8	400 и более	2700 и более
0,0625	0,5	250—670	1800—4000
0,125	1	160—300	1200—2000
0,25	2	100—130	735—1000
0,5	4	50—70	385—475
1,07	9	22—33	200—220
1,79	14	14—19	122—130
3,5	28	7—10	60—65
5	40	5—7	40

Бинокли применяются для осмотра деталей и конструкций ЛА, удаленных от глаза, как правило, на расстояние от 3 м и более.

Изготовляют бинокли двух типов: призменные и галилеевские. В зрительных трубах призменного бинокля для образования прямого изображения служит оборачивающая система из двух призм. Такие бинокли имеют малые размеры, большое поле зрения, повышенную стереоскопичность, увеличение от 3 до 18, угол поля зрения от 4 до 13°.

В галилеевском бинокле окуляром служит рассеивающая линза, которая образует прямое изображение. Эти бинокли проще в конструкции, обладают большой светосилой, имеют увеличение от 2,6 до 6 и угол поля зрения в пределах 5—25°.

Телескопические лупы и бинокли применяют для осмотра увеличенного изображения деталей и узлов авиационной техники, доступных непосредственному осмотру, но расположенных от глаза наблюдателя на расстоянии более 0,6—0,8 м. Например, на авиационном двигателе с помощью этих приборов осматривают форсажные коллекторы, стабилизаторы пламени, обтекатели стяжных болтов, экраны и внутренние конусы реактивных труб, лопатки ротора турбины. На планере осматривают обшивку стабилизаторов и килей, каналы всасывания двигателей, болты и оси подвески управления стабилизаторов, мачты и узлы крепления антенн, рычаги, карданы управления закрылками и другие детали.

При осмотре с помощью телескопических луп и биноклей обнаруживают обрывы и обгорание пера лопаток, риски на их поверхности, деформацию кромок, обрывы болтов и шпилек; деформацию резьбы; повреждение контровок, крупные трещины обшивки, развивающиеся от отверстий под заклепки, коррозию, вмятины обшивки около узлов крепления; выпадание, перекос и ослабление заклепок (по отслаиванию лакокрасочного покрытия, образованию венчиков вокруг головок заклепок и т. д.) и другие повреждения и разрушения деталей и узлов. Нераскрывшиеся трещины усталости, в том числе на лопатках ротора турбины и компрессора, при таком осмотре, как правило, не обнаруживаются.

§ 2.4. Контроль скрытых объектов

Детали и элементы конструкций, не доступные прямому наблюдению, осматривают с применением телескопических приборов — эндоскопов, в которых лучи света изменяют направление относительно первоначального.

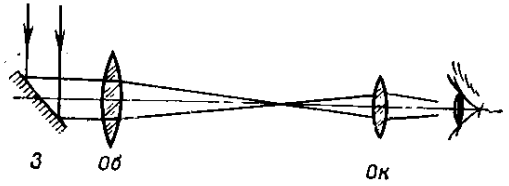


Рис. 2.6. Оптическая система простого эндоскопа: *З* — зеркало; *Об* — объектив; *Ок* — окуляр

Оптическая система простого эндоскопа состоит из телескопической системы и плоского зеркала или призмы, размещаемых перед объективом и отклоняющих лучи (рис. 2.6). Наклоняя зеркало (призму), можно изменять угол отклонения лучей. При этом, если положение зеркала изменяется на угол α, лучи света отклоняются на угол 2α.

Зеркало может быть размещено в средней части прибора, между объективом и окуляром или в других местах оптической системы. Эндоскопы с таким размещением зеркал—коленчатые—применяют в тех случаях, когда каналы для ввода прибора внутрь осматриваемой закрытой конструкции искривлены.

Плоские зеркала и призмы не изменяют увеличения телескопической системы. Поэтому общее увеличение эндоскопа определяется увеличением телескопической системы (см. § 2.3). В современных оптических приборах для изменения направления хода лучей в основном применяют призмы.

По сравнению с обычными телескопическими системами оптическая система эндоскопов должна удовлетворять двум дополнительным требованиям, усложняющим их конструкцию. В этих приборах ход лучей имеет вид ломаных линий. Тем не менее приборы должны давать прямое, неперевернутое изображение. Это

достигается применением оборачивающих систем, тип и количество которых устанавливают в зависимости от числа отражений лучей в эндоскопе.

Второе требование заключается в том, что эндоскоп должен иметь большое поле зрения, хотя его оптическая система заключена в узкую трубу. Это требование можно удовлетворить, если заставить свет проходить вдоль трубы через ряд линз. С увеличением числа линз и уменьшением расстояния между ними поле зрения эндоскопа увеличивается.

По форме корпуса и степени его жесткости эндоскопы разделяют на следующие типы:

— жесткие прямые;
— жесткие коленчатые с постоянным углом колена;
— жесткие коленчатые с изменяемым углом колена;
— гибкие.

Жесткие прямые эндоскопы могут быть без призм или иметь одну призму, установленную перед объективом. Призма может быть неповоротной или качающейся. Положение качающейся призмы изменяют с помощью дистанционной системы управления через рычаги или кольца, закрепленные около окуляра, либо вручную фиксируют в требуемом положении заблаговременно, до ОВ контроля изделия. Вместо качающейся призмы могут быть использованы насадки с разными призмами и различными углами отклонения лучей.

Жесткие коленчатые эндоскопы с постоянным и с изменяемым углом колена имеют как минимум две призмы: перед объективом (неповоротная или качающаяся) и в средней части оптической системы. Эндоскопы с постоянным углом колена, как правило, имеют разборную конструкцию и собираются непосредственно перед применением. В коленчатых эндоскопах с заменяемыми призмами предусматривают использование однотипных вставок с призмами, которые отклоняют лучи на 40, 45, 60, 80, 90, 105° и т. д. В коленчатых эндоскопах с наклоняющимися призмами применяют механизмы, которые обеспечивают синхронный поворот призм при изменении угла между сочлененными частями эндоскопа.

В эндоскопах с вращающимися призмами в каждом подвижном колене применяют пару призм, например прямоугольных (рис. 2.7). Призма I жестко установлена в первой секции эндоскопа, призма II — во второй секции. При вращении призмы II вокруг оси OO_1 направление луча *Б*, выходящего из этой системы, изменяется.

Гибкие эндоскопы содержат жгуты оптических волокон — световодов диаметром обычно менее 0,3 мм (до 10—15 мкм), имеющих световедущую жилу из прозрачного материала и оболочку из материала с меньшим показателем преломления (рис. 2.8). Лучи света, падающие на один торец такого волокна, благодаря полному внутреннему отражению на поверхности раздела жилы и оболочки распространяются вдоль волокна до противоположного торца. Для уменьшения потерь света на отражение, а также для повышения контраста изображения волокна некоторых типов покрывают металлической оболочкой из свинца, алюминия или индия. В жгутах, предназначенных для передачи света к осматриваемым объектам, оптические волокна расположены беспорядочно. В жгуте для передачи изображения волокна

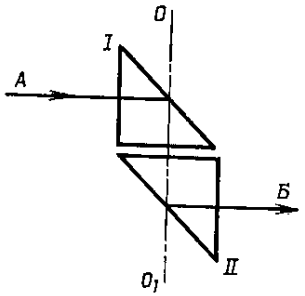


Рис. 2.7. Оптическая схема устройства для изменения угла отклонения лучей с вращающимися призмами:

I, *II* — прямоугольные призмы; OO_1 — ось вращения призм; *АБ* — ход луча

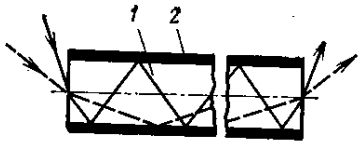


Рис. 2.8. Схема хода луча в оптическом волокне:

1 — световедущая жила; *2* — оболочка

расположены регулярно и идентично на обоих торцах. Каждое волокно несет один элемент изображения. На выходном торце изображение, переданное жгутом, получается мозаичным. Светопропускание жгута не изменяется при его изгибе, если радиус кривизны больше 20—30 диаметров волокна. Изгиб жгута не нарушает передаваемого по нему изображения.

Жгуты оптических волокон применяют в качестве вставок для передачи изображения через шарнирные сочленения жестких приборов, а также в качестве насадок для изменения направления хода лучей перед объективами эндоскопов.

Основными элементами гибких эндоскопов являются регулярные и осветительные жгуты оптических волокон (рис. 2.9). На концах регулярного жгута гибкого эндоскопа устанавливаются объектив и окуляр. С помощью рукоятки, расположенной около окуляра, объективная часть эндоскопа может изгибаться в одной плоскости на угол ±120°. Прибор заключен в защитную оболочку из полихлорвинила или из металлорукава. Эти приборы позволяют осматривать детали в труднодоступных местах конструкций ЛА и двигателей через прямые или искривленные каналы (рис. 2.10).

В качестве источника света применяется осветитель, выполненный в виде отдельного блока, от которого свет в зону осмотра подается по осветительному жгуту. По сравнению с осветителями, расположенными около объектива эндоскопа, такая конструкция

позволяет существенно повысить освещенность деталей путем использования более мощных ламп и концентрации света в узкий пучок, направленный в зону осмотра. Кроме того, при расположении ламп в отдельном блоке снижается пожароопасность эндоскопа.

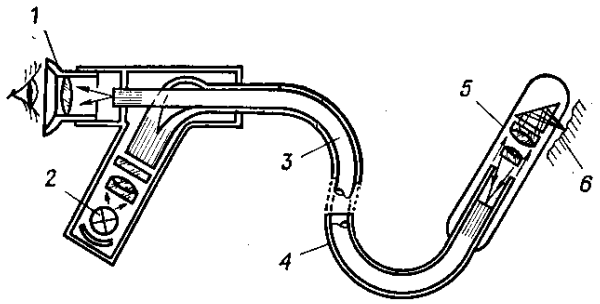


Рис. 2.9. Схема гибкого эндоскопа:

1 — окуляр; *2* — источник света; *3* и *4* — жгуты волокон регулярной и нерегулярной укладки; *5* — головка объектива; *6* — объект контроля

Осветители гибких эндоскопов вместе с осветительным жгутом волокон могут применяться для освещения труднодоступных мест ЛА при их осмотре невооруженным глазом с применением луп, зеркал и других оптических приборов (рис. 2.11).

Угол между осью эндоскопа и осью телесного угла поля зрения называют углом направления наблюдения (обзора) (рис. 2.12). В зависимости от этого угла эндоскопы могут быть прямого, бокового, переднего и заднего (обратного) наблюдения, а также переменного угла наблюдения и кругового обзора. У эндоскопа прямого наблюдения направление осмотра совпадает с направлением луча зрения глаза. Угол направления наблюдения такого эндоскопа принято считать равным 180°. Угол направления наблюдения эндоскопа бокового обзора равен 90°. У эндоскопа переднего обзора этот угол находится в пределах от 90 до 180°, а у эндоскопа заднего обзора — в пределах от 0 до 90°. У эндоскопов с переменным углом обзора угол направления может плавно или ступенчато изменяться в определенных пределах при неизменном положении оптической оси рабочей части эндоскопа. Приборы кругового обзора позволяют производить осмотр участков полостей или деталей, расположенных вокруг продольной оси эндоскопа в пределах 360°, при неизменном положении эндоскопа и его объективной части.

К прямым жестким приборам относятся цистоскопы, бронхоскопы, техноэндоскопы, перископические дефектоскопы. Оптическая трубка цистоскопа представляет собой тонкую металлическую оболочку диаметром 2,6—6 мм, длиной 200—260 мм, внутри которой размещена оптическая система. С одного конца

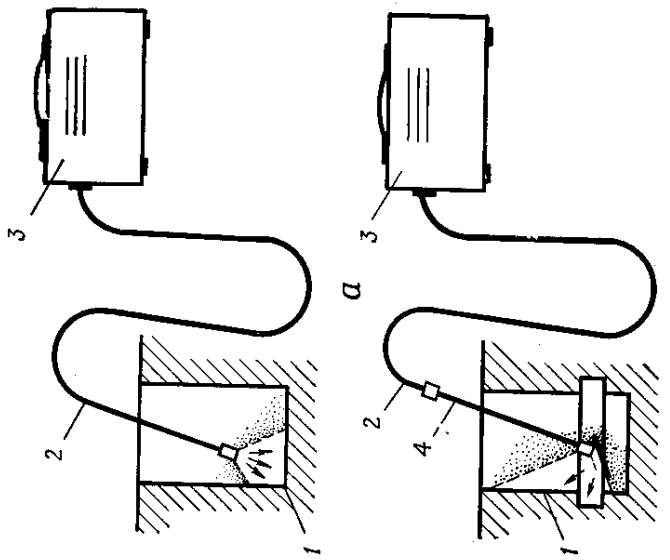


Рис. 2.11. Освещение труднодоступных мест с применением гибких осветительных жгутов волокон прямым лучом света (*а*) и лучом, отраженным от зеркала (*б*):

1 — осматриваемая поверхность; *2* — гибкий жгут волокон; *3* — генератор света; *4* — жесткий жгут волокон с зеркалом

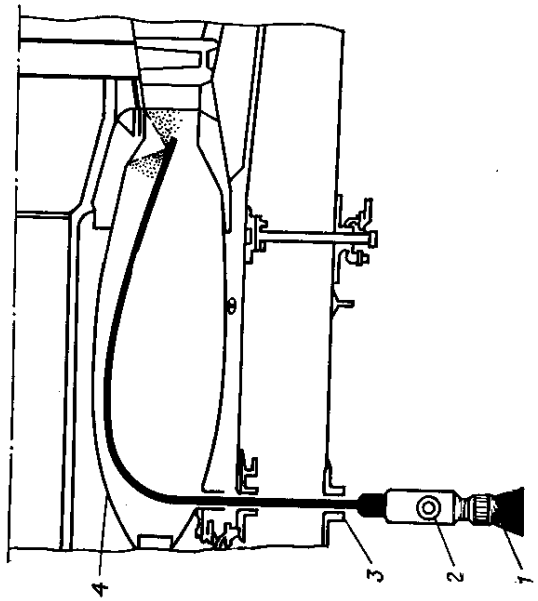


Рис. 2.10. Осмотр камеры сгорания авиационного двигателя с помощью гибкого эндоскопа:

1 — окуляр; *2* — рукоятка управления изгибом эндоскопа; *3* — смотровое отверстие двигателя; *4* — камера сгорания

трубки установлен окуляр, с другого — объектив и призма. Увеличение оптической системы цистоскопов 1,1—1,8. Направление наблюдения в основном боковое. Трубка цистоскопа модели 548 имеет механизм для управления положением призмы и изменения направления осмотра.

Оптическая трубка бронхоскопа модели 451 имеет сечение

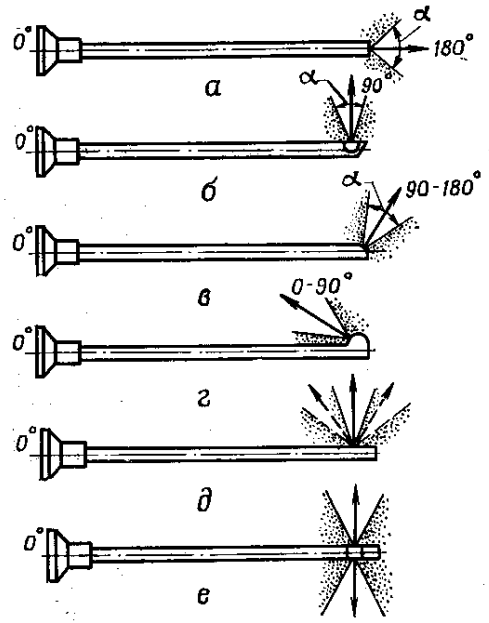


Рис. 2.12. Типы эндоскопов в зависимости от угла направления наблюдения:

а — прямого наблюдения; *б* — бокового наблюдения; *в* — переднего обзора; *г* — заднего обзора; *д* — переменного угла обзора; *е* — кругового обзора (стрелкой изображена ось телесного угла поля зрения α, цифрами указан угол направления наблюдения — между осью эндоскопа и осью телесного угла поля зрения)

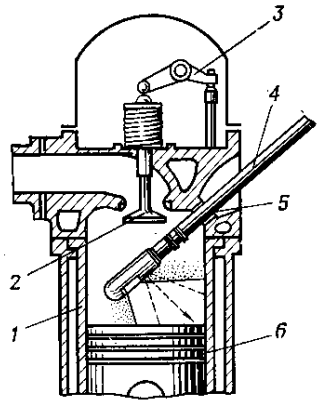


Рис. 2.13. Осмотр головки поршня двигателя прямым жестким эндоскопом:

1 — гильза цилиндра; *2* — клапан; *3* — рычаг клапана; *4* — эндоскоп; *5* — отверстие для свечи; *6* — поршень (стрелкой показано направление осмотра)

4,5×5,5 мм, длину 495 мм. Она обеспечивает осмотр объектов при увеличении 2,4 (на расстоянии от объектива 10 мм) с переменным углом наблюдения от 45 до 115°.

Техноэндоскоп модели 767 представляет собой оптическую трубку длиной 512 мм с диаметром рабочей части 5 мм. Прибор позволяет производить осмотр закрытых деталей и конструкций при увеличении 2,3 (на расстоянии от объектива до осматриваемой поверхности 18 мм).

Указанные приборы используют для осмотра лопаток ротора турбины и компрессора; стенок и крышек цилиндров, клапанов, головок поршня, седел клапанов поршневых двигателей (рис. 2.13); баллонов гидравлической и газовой систем; внутренних поверхностей втулок воздушных винтов, деталей механизмов установки шага воздушных винтов; внутренних полостей гидравлических

цилиндров; резьбовых отверстий; коллекторов, пружин, щеток электроагрегатов; секций крыла и т. д.

К жестким коленчатым эндоскопам относится перископический дефектоскоп ПДК-60 (рис. 2.14). В нем имеются два колена, изменяющие ход лучей на 90 или 75°. Объективная часть прибора имеет переменную длину. В его средней части уста-

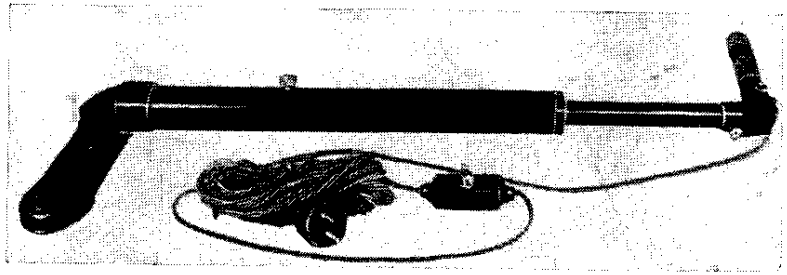


Рис. 2.14. Перископический дефектоскоп ПДК-60

новлена подвижная оборачивающая система, перемещением которой обеспечивают наводку на резкость. Увеличение прибора в пределах 0,5—2,5, поле зрения 45—110 мм. Прибор ПДК-60 используют для осмотра камер сгорания авиадвигателей без их снятия с самолета. Осмотр проводят через отверстия в камере, которые открывают при снятии пусковых форсунок. Прибор позволяет обнаруживать трещины, прогары и разрушения. Дефектоскоп ПДК-60 используют также для осмотра кронштейнов подвески руля высоты, кронштейнов стабилизаторов, фитингов, стенок и поясов лонжеронов, диафрагм, болтов, внутренней стороны обшивки и других элементов конструкции ЛА.

§ 2.5. Особенности оптико-визуального контроля некоторых деталей

При использовании оптических приборов переменного увеличения либо комплектов приборов различного увеличения контроль начинают с малых увеличений. Это дает возможность выбрать на детали опасный участок, оценить его состояние и обнаружить крупные повреждения. Малое увеличение облегчает наводку на резкость и выбор освещения. После исходной установки прибора и грубой наводки на резкость уточняют фокусировку и осматривают зону контроля. Затем при необходимости осмотр повторяют при большем увеличении.

На эффективность ОВ контроля существенное влияние оказывают освещенность деталей и направление освещения. При вертикальном освещении деталей можно увидеть риски и другие следы скольжения на их поверхности. Углубления имеют блестящую поверхность и поэтому зеркально отражают свет, а валики ме-

талла вокруг них имеют шероховатую поверхность и поэтому диффузно отражают свет. Линии трещин зеркально свет не отражают и при вертикальном освещении отличаются от рисок. Боковое и наклонное освещение увеличивает впечатление рельефа вследствие появления теней от неровностей. При этом освещении на светлой поверхности металла легче обнаружить поры, коррозионные язвы, заусенцы и другие повреждения, связанные с изменением микрорельефа поверхности.

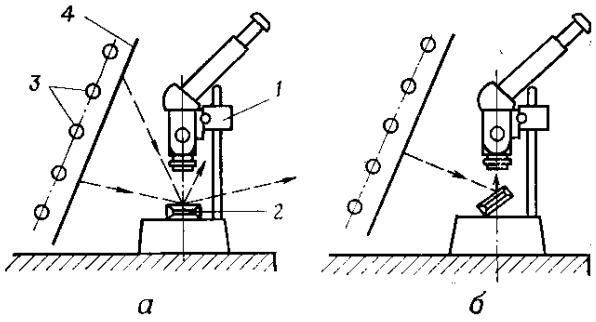


Рис. 2.15. Выбор направления освещения и положения демонтированной детали при оптико-визуальном контроле (максимум отраженных лучей не попадает *(а)* и попадает *(б)* в поле зрения прибора):

1 — бинокулярный микроскоп; *2* — деталь; *3* — люминесцентные лампы дневного света; *4* — светорассеивающий экран

Для повышения контраста темных дефектов на светлой поверхности металла кратковременно можно применять такое направление освещения и положение детали, при которых в поле зрения прибора попадает максимум отраженных лучей (рис. 2.15). Длительное применение такого освещения не допускается из-за ослепления и быстрой усталости глаз.

Оптико-визуальный контроль деталей и узлов на самолете имеет ряд специфических особенностей. Лопатки I ступени ротора осевого компрессора осматривают со стороны входного канала двигателя, а лопатки последней ступени ротора турбины — со стороны реактивной трубы. Перед осмотром лопатки, к которым имеется непосредственный доступ, протирают чистой ветошью, смоченной бензином Б-70. Лопатки освещают переносной лампой ПЛ-36, ПЛ-64 или лампой-фарой ФР-100. При контроле лопаток с темной поверхностью, а также лопаток, удаленных от глаз на 250—300 мм и более, лампа-фара предпочтительнее. Лампу-фару можно разместить на подвижной тележке (двухколесной), которую с помощью штанги продвигают вдоль реактивной трубы двигателя. Лампу-фару устанавливают так, чтобы сосредоточить световой пучок на осматриваемых лопатках ротора.

Осмотр лопаток проводят с применением обзорных, складных карманных или телескопических луп или биноклей. Положение

руки с лупой стабилизируют: при контроле доступных лопаток рукой, держащей лупу, опираются на поверхность проверяемой лопатки; при осмотре удаленных лопаток руку или рукоятку телескопической лупы опирают на детали, например на форсажную камеру, на корпус реактивной трубы и т. д. Бинокль укрепляют на съемном кронштейне. Ротор при осмотре целесообразно медленно вращать для изменения направления осмотра и освещения лопаток и для их более полного обзора.

Осмотр лопаток II и последующих ступеней компрессора и турбины, не доступных для осмотра со стороны входного и выходного каналов двигателя, проводят с помощью эндоскопов через специальные смотровые окна, лючки, или через отверстия под болты крепления лопаток соплового аппарата (в зависимости от типа авиационного двигателя).

Оптико-визуальный контроль лопаток на двигателях, конструкция которых позволяет его осуществлять, имеет следующие особенности. Контроль проводят два специалиста, один из которых осматривает лопатки, а второй по его команде проворачивает ротор двигателя. Перед вводом эндоскопа в двигатель включают осветитель и убеждаются, что лампочка горит. Затем эндоскоп вводят в двигатель и осматривают лопатку одной из ступеней ротора турбины или компрессора, перемещая объектив эндоскопа вдоль ее кромки. При обнаружении дефекта или участка кромки, на котором подозревается его наличие, эту лопатку осматривают повторно. При использовании эндоскопа со сменными окулярами и поворотной объективной призмой лопатку осматривают, изменяя увеличение и положение призмы. При осмотре могут быть обнаружены обрывы пера лопаток, крупные раскрытые трещины, забоины, деформация кромок и другие дефекты.

Мелкие трещины усталости на кромках лопаток при ОВ контроле с помощью эндоскопов не выявляются вследствие наличия загрязнений, коррозии, смолистых отложений, а также из-за низкого контраста и малой ширины раскрытия трещин.

Для осмотра силовых узлов планера и деталей системы управления самолетов применяются оптические приборы, тип которых выбирают в зависимости от целей контроля и степени доступности проверяемых объектов.

Во всех случаях контроля обеспечивают высокую освещенность осматриваемых деталей — примерно до 4000—5000 лк. Такая освещенность деталей является непременным условием эффективного ОВ контроля.

Глава 3

ЦВЕТНАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

§ 3.1. Задачи, решаемые цветным методом в полевых условиях

Цветной метод относится к группе капиллярных методов дефектоскопии, основанных на капиллярном проникновении жидкостей в полости поверхностных дефектов и регистрации возникающих индикаторных рисунков. Эти рисунки обладают высоким оптическим контрастом и имеют ширину линий больше, чем ширина раскрытия дефектов. Они обнаруживаются глазом легче, чем дефекты, и тем легче, чем шире индикаторная линия и выше ее контраст с фоном.

Капиллярный цветной (КЦ) метод отличается от других капиллярных методов тем, что индикаторные рисунки имеют цветную окраску и обнаруживаются при осмотре деталей в видимом свете.

При КЦ контроле преимущественно применяют проникающие жидкости, образующие красный индикаторный рисунок. Красный цвет по сравнению с другими обладает наибольшим психофизиологическим воздействием, оказывает возбуждающее действие, обеспечивает наиболее быстрое возникновение зрительного ощущения и быструю реакцию. Этот цвет воспринимается без ощущения примеси других цветов, что позволяет безошибочно распознавать его в любых условиях. Рисунок красного цвета имеет более высокий цветовой контраст на белом фоне. Это не только способствует хорошей видимости индикаторного рисунка, но и позволяет легко отличать рисунок трещин от рисунка, возникающего при наличии рисок, царапин, заусенцев и других внешне похожих на трещины повреждений металла. Видимость мелких красных рисунков меньше зависит от их размеров, от наличия бликов, неравномерной освещенности зоны контроля и от других факторов. Все это обусловливает большую вероятность обнаружения красных индикаторных рисунков по сравнению с рисунками других цветов.

Капиллярный цветной метод предназначен для обнаружения не видимых невооруженным глазом поверхностных дефектов типа несплошности материала. Он используется для контроля основ-

ного материала деталей из непористых металлов, а также силикатных, гальванических и других защитных покрытий, стойких к воздействию органических растворителей. Метод наиболее эффективен для контроля снятых или расположенных в легкодоступных местах ЛА деталей без защитных покрытий или с покрытиями, которые перед контролем легко удаляются с поверхности деталей с помощью растворителей.

Контроль деталей сложной формы с пазами, проточками, галтелями и отверстиями возможен, если проникающую жидкость можно удалить с их поверхности с помощью масляно-керосиновой смеси и ветоши. Это достигается, если ширина пазов и проточек, радиусы галтелей и отверстий, имеющихся в зоне контроля, не менее 3 мм. На контролируемой поверхности не должно быть уступов с углами менее 90°, глубоких рисок, заусенцев, подрезов, наплывов металла и повреждений, образовавшихся в процессе литья (пористости, раковин, пригаров, наростов и др.). Предпочтительна чистота обработки поверхности в зоне контроля не ниже ▽ 5. Проверяемая зона не должна быть закрыта другими деталями от прямого наблюдения. Поверхность пазов, внутреннюю поверхность отверстий и труб можно проверить на глубину не больше диаметра отверстия, трубы или ширины паза.

В полевых условиях КЦ метод применяют для контроля деталей из жаропрочных, жаростойких, цветных и других немагнитных сплавов в тех случаях, когда использование ультразвукового (УЗ) и вихревых токов (ВТ) методов невозможно или нецелесообразно. В отдельных случаях его применяют для контроля деталей из ферромагнитных материалов, иногда для подтверждения дефектов, обнаруженных УЗ и ВТ методами, для их визуализации, демонстрации или фотографирования. Применение КЦ метода в качестве арбитражного в полевых условиях ограничено, так как с его помощью можно подтверждать наличие только поверхностных дефектов, полости которых открыты и свободны от загрязнений. Подповерхностные дефекты, а также поверхностные дефекты, полости которых заполнены не удаляемыми промывкой веществами, перекрыты слоем деформированного материала или сжаты внутренними остаточными или внешними механическими напряжениями, КЦ методом в полевых условиях не выявляются.

§ 3.2. Физические основы и сущность цветного метода

Капиллярные методы основаны на использовании различных физико-химических явлений: смачивания, капиллярности, сорбции и диффузии.

Смачивание является одной из первых стадий физико-химического взаимодействия жидкости с твердым телом и характеризует степень этого взаимодействия. Оно зависит как от свойств жидкости, так и от свойств твердого тела. Если силы взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела больше, чем

между молекулами самой жидкости, то жидкость хорошо смачивает поверхность твердого тела, прилипает к нему.

Смачивание проявляется в способности жидкости растекаться по горизонтальной поверхности твердого тела. Смачивание бывает статическим (равновесным), при котором линейная граница смачивания неизменна, и кинетическим (неравновесным), когда гра-

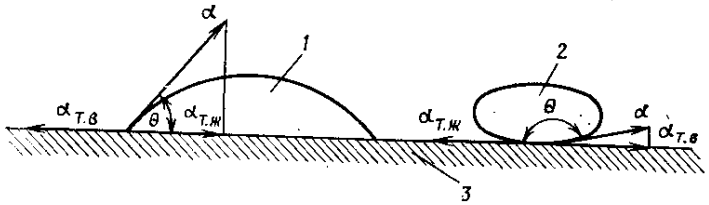


Рис. 3.1. Капля смачивающей *1* и несмачивающей *2* жидкости на горизонтальной поверхности твердого тела *3*

ница смачивания перемещается по поверхности твердого тела. При статическом смачивании капля жидкости принимает на поверхности тела форму линзы (рис. 3.1). Мерой смачивания является косинус краевого угла смачивания Θ, образованного поверхностью твердого тела и плоскостью, касательной к поверхности жидкости в точке границы смачивания. Косинус краевого угла определяется из условия равновесия капли на поверхности:

$$\cos\Theta = \frac{1}{\alpha(\alpha_{т.в} - \alpha_{т.ж})}.$$

Здесь α, $\alpha_{т.в}$, $\alpha_{т.ж}$ — поверхностное натяжение на границе жидкость — воздух, твердое тело — воздух и твердое тело — жидкость. Чем больше $\cos\Theta$, тем меньше краевой угол и лучше смачивание. При $\cos\Theta = 1$ статическое смачивание переходит в кинетическое, полное; избыток жидкости безгранично растекается по поверхности твердого тела. Если $\cos\Theta = -1$, жидкость не вступает в физико-химическое воздействие с твердым телом, не смачивает его.

Капиллярные явления также обусловлены наличием поверхностного натяжения жидкостей. Наиболее простые из них — это всасывание жидкостей в узкие трубки — капилляры (рис. 3.2), щели и поры со смачиваемыми стенками. Всасывание (рис. 3.2, *а*) происходит под действием капиллярного давления *p*, т. е. разности давлений по обе стороны искривленной поверхности жидкости — мениска. Капиллярное давление прямо пропорционально кривизне поверхности жидкости:

$$p = \frac{2\alpha\cos\Theta}{r},$$

где *r* — радиус средней кривизны мениска, который равен радиусу капилляра.

Смачивающие жидкости заполняют полости любой формы. Важно только, чтобы размеры полостей обеспечивали образова-

ние жидкостью мениска сплошной кривизны, без плоских участков. Несмачивающие жидкости выталкиваются из полостей (рис. 3.2, *б*).

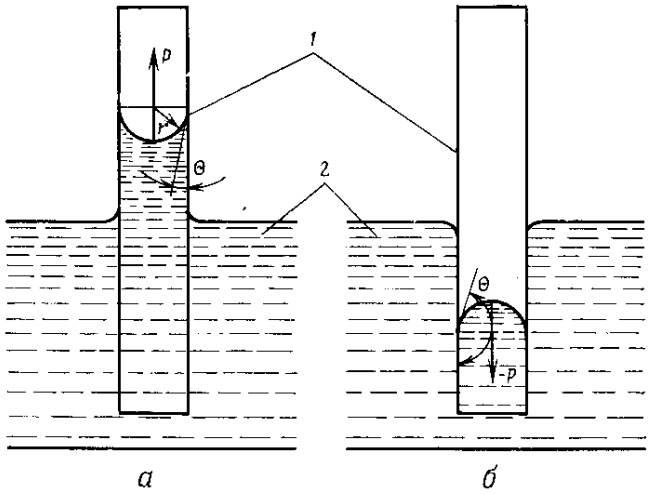


Рис. 3.2. Изменение уровня жидкости *2* в узких трубках-капиллярах *1* при смачивании (*а*) и несмачивании (*б*) ею стенок

Под действием капиллярных сил смачивающие жидкости заполняют полости трещин и других поверхностных дефектов (рис. 3.3). При наличии жидкости на поверхности детали в полости трещины образуется один мениск (рис. 3.3, *а*). Капиллярное давление при этом равно

$$p = \frac{2\alpha\cos\Theta}{b},$$

где *b* — ширина трещины на уровне мениска.

Если жидкость с поверхности удалить или если она испарится (рис. 3.3, *б*), то в полости трещины возникнут два мениска, которые вызовут появление двух капиллярных сил, действующих в прямо противоположных направлениях. В этом случае жидкость будет продолжать продвижение в полость трещины под действием разности давлений

$$p_1 - p_2 = 2\alpha\cos\Theta\left(\frac{1}{b_1} - \frac{1}{b_2}\right),$$

где b_1 и b_2 — ширина трещины на уровне расположения первого и второго менисков.

Жидкость, заполнившая полость трещины, будет удерживаться в ней капиллярным давлением даже в том случае, если ее преднамеренно удалять с поверхности детали. Однако если на второй

мениск, расположенный у поверхности, наложить пористое вещество (например, в виде порошка или краски), то вместо него в порах наложенного вещества образуется система малых менисков

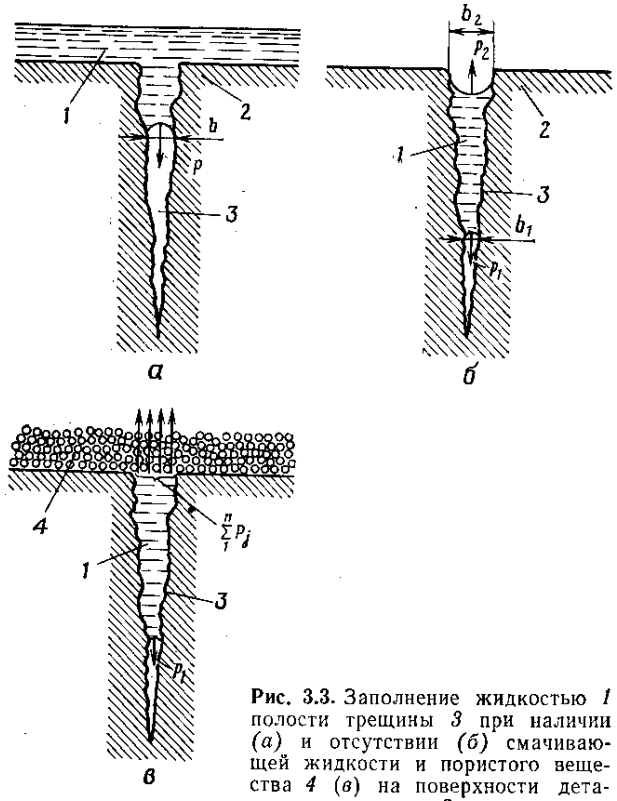


Рис. 3.3. Заполнение жидкостью *1* полости трещины *3* при наличии (*а*) и отсутствии (*б*) смачивающей жидкости и пористого вещества *4* (*в*) на поверхности детали *2*

различной формы и большой кривизны (рис. 3.3, *в*). При этом каждый мениск создает капиллярное давление p_j, которое существенно превышает давление p_1 и действует в противоположном ему направлении. Под действием суммы давлений $\sum_1^n p_j$ жидкость покидает полость трещины и поднимается на поверхность детали. Здесь n — количество менисков, образовавшихся в порах наложенного вещества.

Выход жидкости из полости дефекта под действием капиллярных давлений сопровождается явлениями сорбции и диффузии.

В общем случае **сорбцией** называют физико-химический процесс поглощения каким-либо телом (поглотителем) газов, паров или растворенных веществ из окружающей среды. Если поглощение веществ происходит только на поверхности поглотителя,

явление называют **адсорбцией**, а если вещества поглощаются всем объемом поглотителя—**абсорбцией**. Характер сорбционных процессов зависит от типа и физических свойств жидкости и пористого вещества — поглотителя.

Диффузией называют самопроизвольно протекающий процесс выравнивания в некотором объеме концентрации молекул, ионов, коллоидных или других взвешенных или растворенных частиц под влиянием их теплового хаотического движения. При повышении температуры растет количество диффундирующего вещества. Если при этом жидкость в полости трещины и в поглотителе не испаряется, то ее количество в пористом веществе увеличивается.

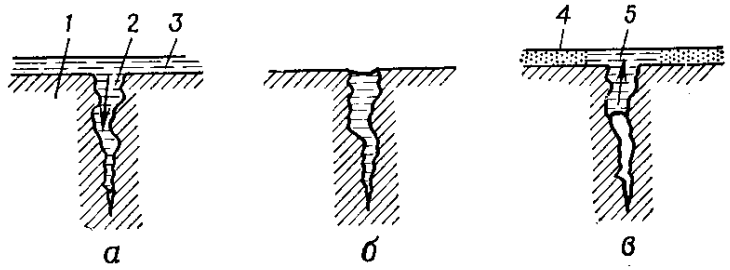


Рис. 3.4. Основные этапы контроля деталей *1* капиллярным методом дефектоскопии:

а — жидкость *3* заполнила полость трещины *2*; *б* — жидкость удалена с поверхности детали; *в* — на деталь нанесен проявитель *4*, над трещиной образован индикаторный рисунок *5*

Контроль деталей КЦ методом состоит в следующем (рис. 3.4). На поверхность детали сначала наносят окрашенную смачивающую (проникающую) жидкость. После небольшой выдержки, достаточной для полного заполнения полостей дефектов под действием капиллярных сил, жидкость удаляют с поверхности детали и на ее поверхность наносят поглотитель (белую проявляющую краску). Проникающая жидкость, оставшаяся в полостях дефектов под действием новых капиллярных сил, а также в результате сорбционных и диффузионных процессов поглощается проявляющей краской. На белом фоне краски образуется окрашенный индикаторный рисунок, свидетельствующий о наличии дефекта и дающий представление о его форме, протяженности и месте расположения.

§ 3.3. Дефектоскопические материалы

Контроль деталей КЦ методом проводят с применением основных дефектоскопических материалов — проникающей жидкости «К», очищающей жидкости — масляно-керосиновой смеси (МКС) и проявляющей краски «М».

Красная проникающая жидкость «К» (ТУ 6-10-750—74) представляет собой подвижную темно-красную жидкость. Она предназначена для заполнения под воздействием капиллярных сил полостей дефектов и последующего образования индикаторного рисунка. Вязкость жидкости «К» при 20° С 0,7—0,9 сСт. Эта жидкость пригодна для контроля как при положительной (до +50° С), так и при отрицательной (до —50° С) температуре. Однако длительное (более 7 ч) ее хранение при отрицательной температуре не допускается.

Очищающая жидкость МКС предназначена для удаления проникающей жидкости с поверхности деталей в процессе контроля. Она представляет собой смесь (по объему) 70% масла МК-8 или трансформаторного и 30% авиационного топлива Т-1, Т-2, ТС-1 или керосина, которую тщательно перемешивают при изготовлении. Вязкость жидкости при 20° С 7—9 сСт.

Белую проявляющую краску «М» (ТУ 6-10-749—74) используют как проявитель (поглотитель) для извлечения из полостей дефектов проникающей жидкости и образования индикаторного рисунка, а также для создания белого фона на поверхности деталей, увеличивающего контраст рисунка. Условная вязкость краски по ГОСТ 8420—74 по вискозиметру ВЗ-4 при 18—20° С 30—40 с. Время высыхания пленки краски около 10 мин.

В качестве вспомогательных материалов при контроле применяют различные растворители и обтирочную ветошь.

Бензин Б-70 (ГОСТ 1012—72 *) используют для промывки деталей перед контролем. Он хорошо растворяет минеральные масла, смазки, консервационные составы, некоторые природные и искусственные смолы и красители. Бензин применяют также для удаления пыли, мягкого сажистого нагара с поверхности деталей и следов керосина из полостей дефектов. Бензин обладает большой летучестью. Его быстрому испарению из полостей дефектов способствуют небольшая вязкость и высокая смачивающая способность. Благодаря этому бензин быстрее, чем другие растворители, покидает полости дефектов.

Технический ацетон (ГОСТ 5.845—71, ГОСТ 2768—69 *) применяют для удаления с деталей некоторых видов лакокрасочных покрытий, остатков смывок АФТ-1, СД и сложных малолетучих растворителей (645, 648, Р-4, Р-5 и др.) перед контролем, а также для удаления проявляющей краски после контроля и для промывки деталей перед повторным контролем КЦ методом. Промывка ацетоном позволяет в некоторой степени удалять влагу из полостей дефектов, прогрев которых для этой цели невозможен. Так же как бензин Б-70, ацетон обладает высокой летучестью и относительно быстро испаряется из полостей дефектов.

Растворители марок 645 (бывший РДВ), 646, 647 и 648 (ГОСТ 18188—72), Р-4, Р-5 и других (ГОСТ 7827—74) используют для очистки деталей от масел, жиров, мягкого нагара, нитроцеллюлозных лакокрасочных покрытий и остатков смывок АФТ-1 и СД после удаления ими лакокрасочных покрытий. Растворителями можно удалять также проявляющую краску с деталей после контроля. Эти растворители содержат малолетучие компоненты, которые медленно испаряются из полостей дефектов. Поэтому в случае промывки ими деталей перед контролем требуется дополнительная промывка ацетоном.

Смывки $СД_{об}$ (ТУ МХП 902—42), $СД_{сп}$ (ТУ МХП 1113—44) и АФТ-1 (ТУ 6-10-1202—71) применяют для удаления масляных, нитроцеллюлозных, перхлорвиниловых и других лакокрасочных покрытий; наиболее эффективна для этих целей смывка АФТ-1. Смывки содержат малолетучие растворители, а также нафталин и парафин. Поэтому после их применения требуется промывка деталей растворителем марки 645 и ацетоном.

Ветошь (ГОСТ 5354—74) необходима для очистки локальных зон деталей с помощью растворителей перед контролем и для удаления жидкости «К», очищающей жидкости МКС и краски «М» с контролируемой поверхности. Используют крепкую некрашеную и чистую ветошь из тонких или полутонких тканей (миткаль, бязь, батист, сатин) без следов ржавчины, абразивной пыли, металлической стружки и других примесей.

§ 3.4. Особенности хранения и проверка качества дефектоскопических материалов

Дефектоскопические материалы хранят в закрытых складских помещениях, безопасных в пожарном отношении, в емкостях пробками и крышками вверх, предохраняя тару от воздействия солнечных лучей и влаги. Емкости должны быть исправны, пробки и крышки плотно закрыты.

Если дефектоскопические материалы находились при низкой температуре (минус 30° С и ниже) более 7 ч, перед использованием жидкость «К» выдерживают при положительной температуре не менее суток, периодически перемешивая, и дают отстояться не менее 1 ч. Белую проявляющую краску «М» перед использованием тщательно перемешивают.

Проверку качества основных дефектоскопических материалов проводят путем их испытания на способность к выявлению трещин на контрольных образцах. Испытание проводят каждый раз перед началом работы и при поступлении новой партии материалов.

Контрольные образцы (рис. 3.5) входят в состав комплекта переносных дефектоскопов ДМК-4 и У-ДМК-5. В состав дефектоскопов входят также дефектограммы или фотографии трещин, выявленных на обоих образцах с применением кондиционных дефектоскопических материалов. Первый контрольный образец служит в качестве рабочего, второй — в качестве поверочного. Рабочий образец применяют для проверки качества дефектоскопических материалов каждый раз перед началом КЦ контроля. Поверочный применяют только в случаях, когда на рабочем образце не выявились или плохо выявились трещины и необходимо определить, не вышел ли он из строя (не загрязнился ли).

При проверке качества дефектоскопических материалов индикаторный рисунок трещин, выявленных на рабочем образце, сравнивают с соответствующей дефектограммой или фотографией. Особое внимание обращают на полноту выявления трещин, контрастность, резкость, яркость их рисунка и состояние фона образца.

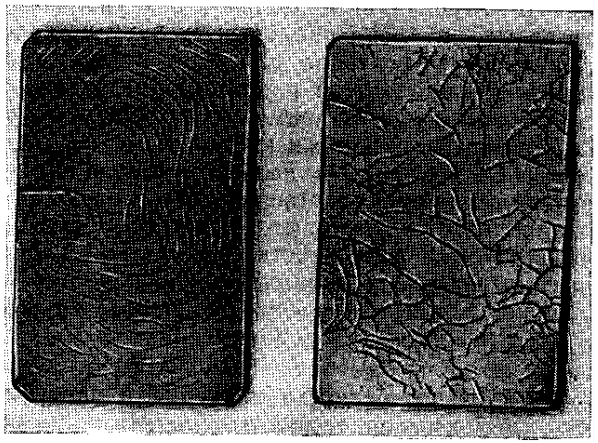


Рис. 3.5. Контрольные образцы с трещинами, выявленными КЦ методом

Качество составов считают удовлетворительным, если с их помощью выявляются все трещины четко, полностью, без разрывов.

В случае невыявления или неполного выявления трещин на рабочем образце проверку материалов нужно провести на поверочном контрольном образце. Если при этом на поверочном образце трещины также не выявляются или выявляются плохо, дефектоскопические материалы признают негодными. Если на поверочном образце трещины выявляются хорошо, это означает, что рабочий образец загрязнен и подлежит очистке или замене.

При очистке образец промывают сначала в растворителе марки 645 или в ацетоне, затем выдерживают в чистом ацетоне 16—20 ч, протирают ветошью и прогревают в сушильном шкафу в течение 1—2 ч. Стальные хромированные образцы прогревают при температуре 270—300° С, а не хромированные — при температуре 100—120° С. Прогрев образцов без предварительной тщательной очистки в растворителе, а также при температуре 150—200° С не допускается. При такой температуре остатки красителя проникающей жидкости в полостях трещин превращаются в твердое прочное нерастворимое вещество, резко ухудшающее выявляемость трещин. Если же образцы нагревать до температуры 100—120° С, остатки красителя не претерпевают таких изменений. При температуре выше 250° С образовавшееся нерастворимое вещество разлагается.

Сильно загрязненные образцы после промывки в растворителе марки 645 или в ацетоне и выдержки в чистом ацетоне целесообразно, если имеется такая возможность, подвергать ультразвуковой очистке в среде ацетона с последующим прогревом.

Дефектограммы, на которых с течением времени рисунки трещин расплылись или заметно уменьшилась насыщенность их окраски, а также дефектограммы, имеющие механические повреждения пленок, подлежат замене.

Для изготовления дефектограмм выполняют контроль рабочего и поверочного контрольных образцов КЦ методом, применяя кондиционные дефектоскопические материалы. Проявляющую краску «М» наносят краскораспылителем несколько более толстым слоем, чем при контроле деталей. Через 20—60 мин после нанесения белой проявляющей краски на поверхности образца образуется плотная белая пленка с четким индикаторным рисунком трещин. Эту пленку краски надрезают по краям образца и снимают, затем пленку зажимают между пластинами из органического стекла, и дефектограмма готова. Дефектограмму можно изготовить и другим способом. На поверхность проявляющей краски, нанесенной на образец, можно наклеить прозрачную липкую ленту. Эту ленту вместе с приставшей к ней пленкой краски снимают с образца. С противоположной стороны на нее наклеивают еще одну липкую ленту так, чтобы пленка краски оказалась между двумя слоями ленты. Перед наклейкой второго слоя ленты на пленку помещают этикетку с обозначением номера образца, с которого снята дефектограмма. Дефектограммы, изготовленные с применением липкой ленты, пригодны к использованию в течение 6—8 месяцев. Дефектограммы, изготовленные без липкой ленты, сохраняются в течение 1—1,5 лет.

Для оценки качества материалов целесообразно также проверять вязкость белой проявляющей краски «М» и внешний вид проникающей жидкости «К», особенно при поступлении новых партий или после их длительного хранения. По вязкости проявляющей краски проверяют степень ее размешивания после длительного хранения, устанавливают необходимость ее разбавления, а также более точно выбирают режимы ее распыления краскораспылителем — расстояние до контролируемой детали и расход воздуха.

Вязкость белой проявляющей краски «М» определяют с помощью вискозиметра ВЗ-4 (ГОСТ 9070—59), измеряя время непрерывного истечения 100 мл краски через калиброванное сопло. Уменьшение вязкости может быть следствием недостаточного перемешивания белой краски при переливании из одной емкости в другую. При вязкости ниже 30 с краска бракуется только в том случае, если она не обеспечивает необходимой чувствительности на контрольных образцах. При вязкости краски больше 40 с (но не более 55 с) ее можно довести до нормы, добавляя ацетон или смесь ацетона и этилацетата (бутилацетата) в соотношении 1 : 1; краску при этом тщательно перемешивают.

Для определения внешнего вида красной проникающей жидкости ее наливают в стеклянную пробирку диаметром 10—15 мм и рассматривают в проходящем свете. Если в жидкости обнаруживают осадок, муть, расслаивание, взвешенные частицы, то жидкость допускают к использованию только после фильтрации через ткань или через бумажный фильтр, если при этом она соответствует требованию к чувствительности на контрольных образцах.

§ 3.5. Подготовка деталей к контролю

Перед контролем детали тщательно очищают от загрязнений: масла, смазки, консервационных составов, влаги и льда, смолистых отложений, пыли, нагара, неиспаряющихся органических растворителей, окисных пленок, продуктов коррозии и других веществ, находящихся на поверхности детали и заполняющих или перекрывающих полости дефектов. Кроме загрязнений удаляют декоративные и защитные покрытия, в первую очередь лакокрасочные, которые препятствуют обнаружению несплошностей основного материала деталей и создают ложные дефекты.

Способ очистки выбирают так, чтобы удалить загрязнения из полостей дефектов, но не внести в них новые. В результате очистки на поверхности деталей и в полостях дефектов должны оставаться только легколетучие вещества, удаляемые при сушке.

В полевых условиях очистку деталей в основном проводят органическими растворителями. Первоначально детали промывают растворителем, наиболее активно растворяющим данный вид загрязнений (см. § 3.3). При этом используют волосяные щетки, кисти или ветошь. В случае применения малолетучих растворителей детали дополнительно промывают бензином Б-70 или ацетоном.

Способы удаления загрязнений и лакокрасочных покрытий с помощью растворителей указаны в табл. 5. Смывки АФТ-1 и $СД_{об}$ наносят на детали обильным слоем и выдерживают на их поверхности до вспучивания и размягчения лакокрасочных покрытий (в течение 15—40 мин). Размягченное покрытие смывают сначала растворителем марок 645, 648 или другим, затем ацетоном, используя жесткие волосяные щетки, кисти. Применение металлических щеток и скребков не допускается. Если в зоне контроля остаются участки неудаленного покрытия, деталь повторно обрабатывают смывкой и промывают растворителями.

Наиболее простым способом сушки является выдержка деталей на воздухе в течение 15—20 мин. После промывки деталей ацетоном или бензином Б-70 в результате такой сушки от растворителя освобождается 40—60% объема трещины. Этого достаточно для ее обнаружения КЦ методом. Однако для обеспечения более полной очистки деталей и максимальной чувствительности контроля, для выявления трещин при отрицательной температуре в тех случаях, когда их полости могут быть заполнены льдом, детали необходимо сушить, обдувая их потоком горячего воздуха.

Таблица 5

Способы удаления загрязнений растворителями

Удаляемые вещества и загрязнения	Основные операции очистки деталей				
	Очистка смывкой АФТ-1 или $СД_{об}$	Очистка смывкой $СД_{сп}$ или растворителем марок 645, 648, Р-4 и т. д.	Промывка ацетоном	Промывка бензином Б-70	Сушка на воздухе
Ацетон, бензин Б-70	—	—	—	—	+
Керосин, пыль, мягкий нагар, каучук, следы резины	—	—	—	+	+
Масло, смазка, консервационный состав	—	±	—	+ (двух-трехразовая или выдержка в ванне)	+
Проявляющая краска «М», нелетучие органические растворители (марок 645, 648, Р-4, Р-5 и др.), вода	—	—	+	—	+
Лакокрасочные покрытия:					
а) однослойные нитроцеллюлозные свежие	±	±	+	—	+
б) многослойные нитроцеллюлозные, масляные, перхлорвиниловые свежие	±	+	+	—	+
в) те же старые	+	+	—	—	+

Примечание. Знаками указаны: «—» — невыполняемые операции; «+» — обязательно выполняемые операции; «±» — допускаемые операции.

Демонтированные детали целесообразно сушить в сушильном шкафу при температуре (не более): детали из алюминиевых и магниевых сплавов — 80—100° С; из углеродистых сталей — 100—120° С; из легированных сталей — 150—200° С; из жаростойких сталей — 250—300° С; из титановых сплавов — 200—350° С; из жаропрочных никелевых сплавов — 390—410° С. При превышении указанных температур тонкая пленка окислов, образующаяся не только на поверхности детали, но и в полостях дефектов, уменьшает ширину их раскрытия или полностью перекрывает их полости (рис. 3.6). Эта пленка препятствует выявлению дефектов КЦ методом.

Способ очистки поверхности деталей шлифовальными шкурками применяют только в исключительных случаях. Этот способ позволяет удалять с поверхности деталей продукты коррозии и окалины, твердые пригоревшие углеродистые отложения, поверхностные окисные пленки и другие вещества, не удаляемые с помощью органических растворителей. Однако в процессе такой очистки происходит заполнение полостей дефектов металлической

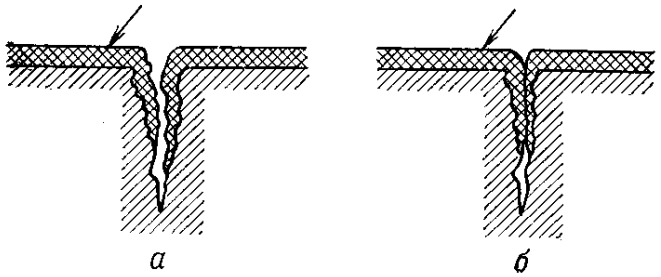


Рис. 3.6. Окисная пленка (показана стрелкой) на поверхности детали и в полости трещины: пленка уменьшает ширину раскрытия трещины (*а*) или перекрывает ее полость (*б*)

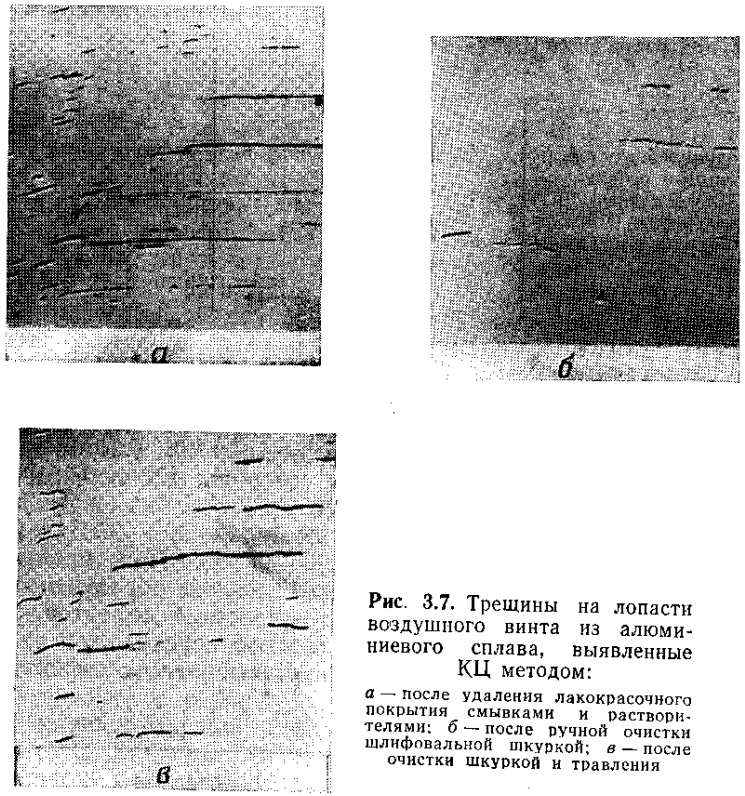


Рис. 3.7. Трещины на лопасти воздушного винта из алюминиевого сплава, выявленные КЦ методом:

а — после удаления лакокрасочного покрытия смывками и растворителями; *б* — после ручной очистки шлифовальной шкуркой; *в* — после очистки шкуркой и травления

и абразивной пылью, частицами удаляемых с поверхности веществ. При обработке шкуркой деталей из мягких материалов (из магниевых и алюминиевых сплавов, сталей с твердостью менее 40 HRC и т. д.) и деталей с мягкими гальваническими покрытиями (медь, цинк, кадмий) полости дефектов могут перекры-

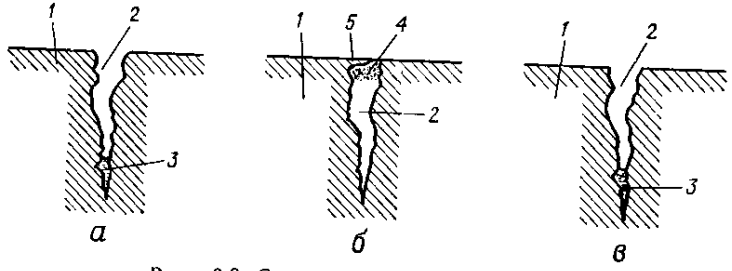


Рис. 3.8. Состояние полости трещины:

а — после удаления лакокрасочного покрытия смывками и растворителями; *б* — после ручной очистки шлифовальной шкуркой; *в* — после очистки шкуркой и травления; *1* — контролируемый объект; *2* — полость трещины; *3* — остатки смывок, растворителей или реактивов в полости трещины; *4* — металлическая и абразивная пыль; *5* — слой деформированного металла

ваться тонким слоем пластически деформированного металла. После такой очистки дефекты могут быть не обнаружены КЦ методом (рис. 3.7 и 3.8). Поэтому очистку шкуркой допускают, когда не требуется высокая чувствительность контроля, когда после очистки шкуркой деталь может быть подвергнута до контроля травлению и, если возможно, ультразвуковой очистке.

На поверхности деталей из магниевых и алюминиевых сплавов после удаления лакокрасочного покрытия могут быть следы коррозии: пятна или порошкообразный налет белого, пепельно-серого или черного цвета. От продуктов коррозии зону контроля очищают травлением в химических реактивах. Детали из магниевых сплавов обрабатывают водным раствором хромового ангидрида с концентрацией 150—250 г/л при температуре +15—30° С. Алюминиевые детали очищают в течение 15—30 мин раствором состава 720 мл воды, 200 мл ортофосфорной кислоты и 80 г хромового ангидрида. После такой обработки детали промывают водой, затем нейтрализуют следы реактива слабым щелочным раствором, детали снова моют, затем сушат в потоке теплого воздуха либо дважды промывают чистым ацетоном. Травление применяют также для удаления деформированного поверхностного слоя металла и вскрытия полостей трещин.

§ 3.6. Технология проявления дефектов

При КЦ контроле последовательно выполняют следующие технологические операции: нанесение проникающей жидкости на детали, удаление проникающей жидкости, нанесение белой проявляющей краски, выдерживание деталей для проявле-

ния дефектов, осмотр деталей и удаление проявляющей краски (рис. 3.9).

Красную проникающую жидкость «К» наносят на деталь 3—4 раза (обильным слоем) кистью, валиком из губчатых материалов, обливанием или погружением. После нанесения каж-

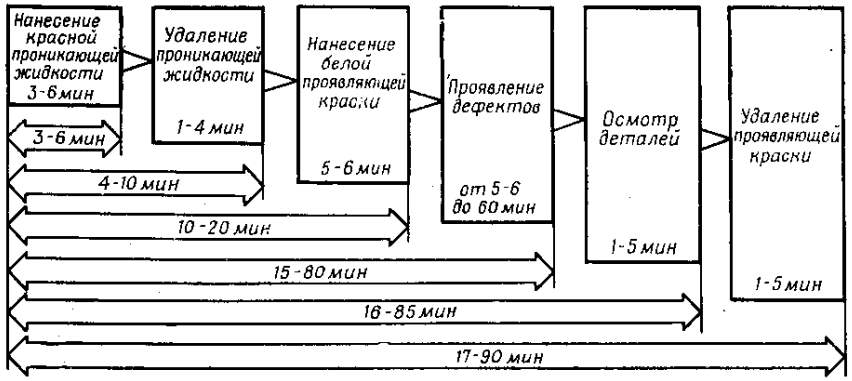


Рис. 3.9. Порядок контроля деталей капиллярным цветным методом и допускаемая продолжительность выполнения технологических операций

дого из первых двух-трех слоев жидкости детали выдерживают на воздухе в течение 1,5—2 мин. Допускается также наносить проникающую жидкость однократным погружением деталей в ванну на 3—5 мин.

Удаляют проникающую жидкость с поверхности детали сразу после нанесения последнего слоя, не допуская его высыхания (не позже чем через 10—15 с). Для этого кистью, ветошью, окунанием или другим способом наносят очищающую жидкость МКС, которую затем удаляют сухой чистой ветошью. Продолжительность контакта жидкости МКС с поверхностью деталей не должна превышать 5 мин. Более продолжительный контакт и длительное удаление МКС приводят к частичному удалению проникающей жидкости из полостей дефектов, что снижает чувствительность контроля.

Белую проявляющую краску «М» наносят на поверхность детали мягкой волосяной кистью или краскораспылителем не позже чем через 5 мин после удаления проникающей жидкости. Проявляющую краску наносят кистью при контроле локальных зон простой формы на деталях в конструкции ЛА в тех случаях, когда не требуется высокая чувствительность или невозможно применить краскораспылитель. Краску наносят в один слой, не допуская нанесения повторного слоя. Кистью невозможно нанести равномерный слой проявляющей краски, особенно на поверхность сложной формы, поэтому с ее помощью нельзя получить высокую чувствительность контроля. Применение кисти неэффективно при контроле узких пазов, шлицев, резьбы, проточек и других участ-

ков поверхности сложной формы. Кроме того, нанесение краски кистью — процесс трудоемкий и малопроизводительный. Краскораспылитель позволяет наносить на детали тонкий равномерный слой краски, благодаря чему достигается высокая чувствительность контроля, в том числе деталей сложной формы. Для получения необходимой белизны фона и одновременного уменьшения прозрачности слоя проявляющей краски ее можно наносить многократно, в несколько слоев.

После нанесения проявляющей краски детали выдерживают для проявления дефектов. При температуре 18—20° С через 5—6 мин образуется индикаторный рисунок на деталях и контрольных образцах с относительно крупными дефектами, например с трещинами усталости шириной 0,01—0,02 мм и более. Трещины термического происхождения, даже крупные, выявляются медленнее. Стенки полостей таких трещин (например, «горячих» трещин литья и сварки, закалочных и др.) окислены. Окисные пленки уменьшают ширину устья трещин (см. рис. 3.6). Пористые продукты окисления, кроме того, удерживают проникающую жидкость вследствие появления в их порах капиллярных сил. Поэтому индикаторный рисунок трещин термического происхождения формируется примерно через 1 ч.

Столь же медленно проявляются трещины коррозионной усталости и коррозионное растрескивание материала на стальных деталях, деталях из магниевых и других сплавов, узкие усталостные трещины (шириной менее 0,01 мм), а также трещины, полости которых сжаты внутренними остаточными либо внешними механическими напряжениями. Поэтому осмотр деталей для обнаружения индикаторного рисунка дефектов проводят примерно через 1 ч.

Продолжительность выдержки деталей при температуре ниже 18° С для полного проявления дефектов должна быть увеличена в 1,5—2 раза.

Для ускорения проявления дефектов через 10—15 мин выдерживания на воздухе после нанесения проявляющей краски детали можно прогреть в течение 30—60 мин потоком теплого воздуха или в сушильном шкафу при температуре не более 40—50° С. Такой прогрев увеличивает скорость диффузии проникающей жидкости в пленку проявляющей краски.

После осмотра деталей (см. § 3.7) проявляющую краску удаляют с их поверхности ацетоном, растворителем марки 645 или другим растворителем нитролаков и нитрокрасок.

§ 3.7. Осмотр деталей и анализ рисунка дефектов

После проявления дефектов детали осматривают с целью обнаружения индикаторного рисунка при высокой освещенности в зоне контроля. Например, на стационарных рабочих ме-

стах, предназначенных для осмотра небольших деталей, снятых с ЛА, обеспечивают освещенность 3000—4000 лк при использовании люминесцентных ламп дневного света и 2000—3000 лк при использовании ламп накаливания. Детали в конструкции ЛА освещают переносной лампой или лампой-фарой.

С целью поиска индикаторного рисунка дефектов осматривают детали, на которых слой белой проявляющей краски не имеет пороков и загрязнений: пятен неудаленной проникающей или очищающей жидкости, механических повреждений, не покрытых краской участков поверхности, потеков, складок и морщин, отслаивания от поверхности детали, посторонних включений. Детали с такими повреждениями краски, затрудняющими обнаружение рисунка дефектов, промывают ацетоном и подвергают повторной обработке дефектоскопическими материалами.

Осмотр деталей проводят в два этапа: 1) общий осмотр поверхности для поиска индикаторного рисунка; 2) анализ рисунка. Общий осмотр проводят невооруженным глазом или с применением луп с большим полем зрения и малым увеличением. Для анализа индикаторного рисунка, как правило, используют оптические средства. Во многих случаях при общем осмотре и анализе рисунка применяют один и тот же оптический прибор.

По особенностям красного индикаторного рисунка и его месту на детали можно определить вид дефекта.

Трещины усталости, например, выявляются чаще в виде одиночных изломанных линий, расположенных в местах концентраторов напряжений (галтелей, подрезов, отверстий, пазов и т. д.), поперек ребер, кромок (см. рис. 1.4, *а*, 1.6, *а*, 3.10).

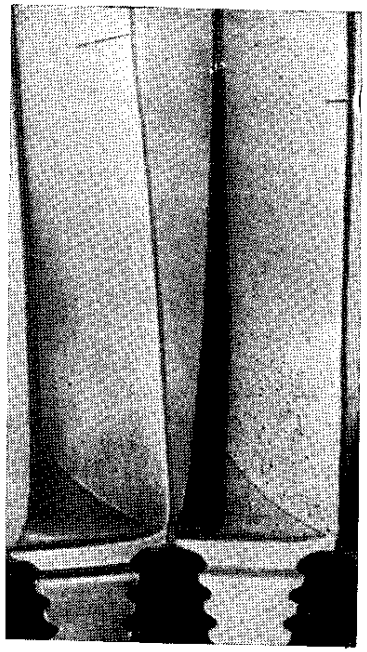
Волосовины выявляются в виде линий, ориентированных вдоль волокон металла, вдоль направления его деформации при изготовлении детали, например вдоль оси болта или трубы. Если волокна металла изогнуты, волосовины следуют за их направлением (рис. 3.11).

В отличие от волосовин заковы и соответствующие им линии рисунка могут иметь случайное направление (рис. 3.12).

Трещины коррозии под напряжением, как правило, отличаются наличием большого количества изломов и ответвлений (рис. 3.13).

Индикаторный рисунок неслитин в виде одиночных линий или группы линий соответствует направлению потоков металла при литье (рис. 3.14). В виде четких, иногда прерывистых, линий выявляются также трещины термической усталости, коррозионной усталости и заковы.

Индикаторный рисунок трещин ползучести показан на рис. 1.6, *б*. Примеры выявления растрескивания материала и шлифовочных трещин приведены на рис. 3.15—3.17. Картина язвенной коррозии показана на рис. 1.5, *а* и 3.18, очагов межкристаллитной коррозии — на рис. 3.19, эрозионных поражений — на рис. 3.10. Эти дефекты проявляются в виде группы коротких линий или сетки (растрески-



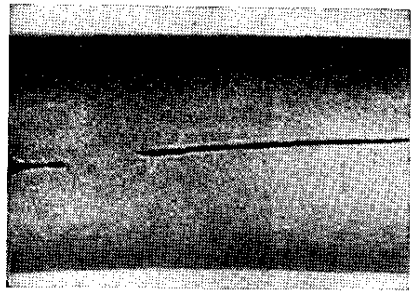


Рис. 3.11. Волосовина в материале трубопровода гидросистемы

Рис. 3.10. Трещины усталости и точечные эрозионные поражения на лопатках ротора турбины

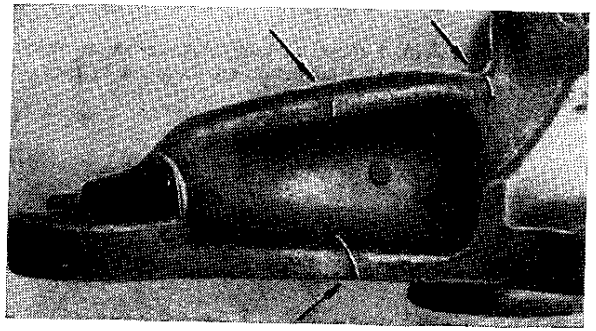


Рис. 3.12. Заковы на ребрах жесткости кронштейна

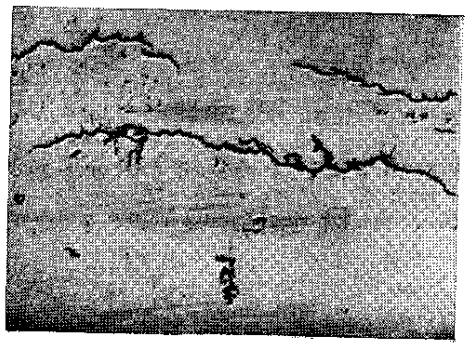


Рис. 3.13. Трещины коррозии под напряжением на поверхности реборды авиационного колеса

Рис. 3.14. Неслитины на барабане авиационного колеса

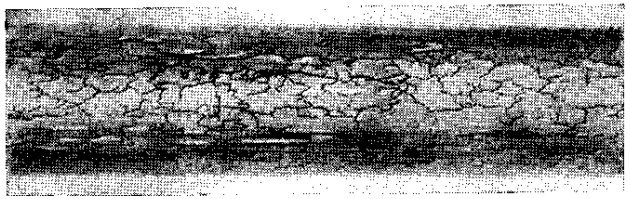
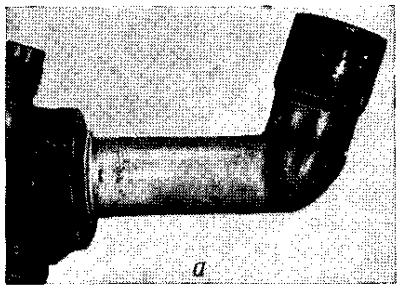


Рис. 3.15. Растрескивание детали из алюминиевого сплава из-за воздействия высокой температуры



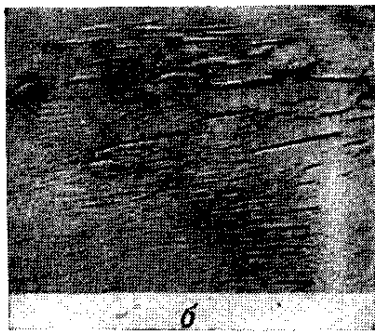


Рис. 3.16. Растрескивание гальванического покрытия рабочей форсунки двигателя:

а — общий вид форсунки; *б* — участок растрескивания покрытия (10-кратное увеличение)

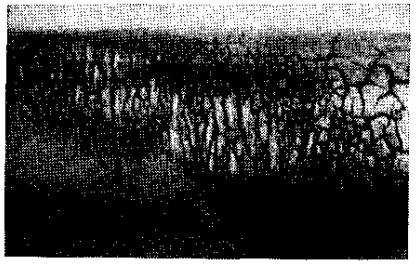


Рис. 3.17. Шлифовочные трещины на хромированной поверхности

Рис. 3.18. Поверхностная коррозия материала авиационного колеса

Рис. 3.19. Очаги межкристаллитной коррозии на стальной лопатке ротора компрессора (10-кратное увеличение)

вание материала, шлифовочные трещины, межкристаллитная коррозия крупнозернистых сплавов), в виде пятен, размытых полос (межкристаллитная коррозия мелкозернистых сплавов), в виде точек, звездочек (поры, язвенная коррозия, выкрошивание материала, эрозия). Такой рисунок считают основным признаком соответствующего дефекта.

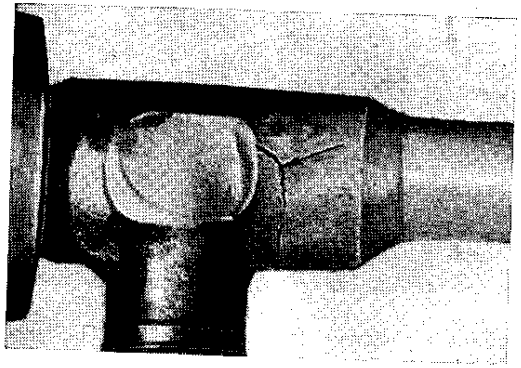


Рис. 3.20. Индикаторный рисунок ложной трещины (показан стрелкой), образованный неудаленной красной проникающей жидкостью, высохшей на границе зоны контроля тройника трубопровода

Индикаторный рисунок на поверхности детали может возникать не только в местах дефектов. Он может появиться также при наличии различных допустимых повреждений или загрязнений поверхности. Например, схожий с трещинами рисунок образуют: риски, заусенцы (особенно смятые); цепочки эрозионных поражений, забоин, пор; сколы окисной пленки; коррозия (в основном щелевая) в местах линейного контакта деталей; литейные складки, наплывы сварных швов; галтели малого радиуса, следы резцов, протяжек; узкие зазоры между деталями (например, при прессовой посадке); следы полимеризовавшихся масел и смазок, лакокрасочных покрытий, клея, налипшей резины; окрашенные волокна ветоши; следы присохшей проникающей жидкости (рис. 3.20) или кристаллов красителя и т. д. Поэтому обнаружение рисунка, соответствующего рассмотренным выше основным признакам дефектов, еще не является основанием для браковки детали. Рисунок, являясь необходимым признаком дефекта, привлекает внимание дефектоскописта, который по различным дополнительным признакам должен установить наличие дефекта, его протяженность, вид и характер.

Наиболее существенными дополнительными признаками, по которым отличают индикаторный рисунок действительного дефекта от ложного, являются:

— место расположения рисунка (относительно концентраторов напряжений, узлов колебаний и т. д.);

— направление линий рисунка относительно оси детали и действующих нагрузок;

— конфигурация линий рисунка, наличие изломов и разветвлений;

— четкость и степень подобия контуров, т. е. границ линий рисунка;

— цвет и яркость, насыщенность окраски;

— скорость образования рисунка и характер его изменения с течением времени;

— микрорельеф поверхности слоя проявляющей краски в зоне рисунка;

— наличие подобного рисунка в соседних зонах детали.

При анализе индикаторного рисунка дополнительные признаки рассматривают последовательно в изложенном порядке. Однако для определения характера рисунка не обязательно анализировать все признаки. В некоторых случаях достаточно рассмотреть два-три из них. Так, по месту, направлению и конфигурации линий отличают рисунок трещин усталости от рисунка, образованного волосовинами, рисками, цепочками эрозионных поражений и другими повреждениями поверхности детали. В сложных случаях проводят анализ рисунка по всем дополнительным признакам.

Рассмотрим, например, чем схожи и чем отличаются индикаторные рисунки трещин усталости на лопатке I ступени ротора компрессора, цепочек эрозионных поражений и забоин и следов полимеризовавшихся масел и смазок (табл. 6). Трещины усталости на лопатках ротора компрессора развиваются на кромках или по галтели перехода от замка к перу (со стороны корыта) и направлены поперек кромок или вдоль галтелей. Индикаторный рисунок трещин имеет изломы, видимые невооруженным глазом или при осмотре с лупой с увеличением 4—7. Линии рисунка четкие, темно-красного цвета, границы линий подобны одна другой. Микрорельеф слоя проявляющей краски в зоне трещины соответствует неповрежденной поверхности детали (если деталь не находится на грани разрушения и трещина не раскрыта).

Рисунок цепочки эрозионных поражений и забоин также может быть четким, темно-красного цвета, с изломами и разветвлениями. Однако в отличие от рисунка трещин этот рисунок может иметь любое направление относительно кромки. Границы линий рисунка, как правило, не подобны одна другой, в некоторых местах линии утолщаются, прерываются. На поверхности слоя проявляющей краски по всей линии рисунка видны углубления, соответствующие повреждениям поверхности металла.

Тонкие следы полимеризовавшихся масел и смазок на лопатках, не удаленные при очистке зоны контроля, также могут образовать рисунок, схожий с рисунком трещины. Эти загрязнения выявляются в виде красных линий, расположенных на входной кромке, спинке или корыте лопатки. Границы линий рисунка по-

Таблица 6

Некоторые дополнительные признаки индикаторного рисунка трещин и ложных дефектов на лопатках ротора компрессора, сравниваемые при анализе рисунка

Дополнительные признаки рисунка	Индикаторный рисунок		
	трещин усталости	цепочки эрозионных поражений и забоин	следов полимеризовавшихся масел и смазок
Место расположения рисунка и направление его линий	Поперек кромок, вдоль галтелей	Любое	По направлению воздушного потока
Наличие изломов линий рисунка (осмотр при увеличении 2—4)	Имеются	Имеются	Имеются или отсутствуют
Степень подобия границ линий (осмотр при увеличении 7—10)	Границы *1* и *2* подобны одна другой	Границы *1* и *2* не подобны одна другой	Границы *1* и *2* подобны одна другой

добны одна другой. Линии, расположенные у торцевой кромки лопатки, могут иметь изломы и изгибы. Однако в отличие от рисунка трещин эти линии ориентированы по направлению воздушного потока — под острым углом к входной кромке или вдоль торцевой кромки лопатки. Линии, расположенные в средней части по высоте лопатки, не имеют изломов и разветвлений. Рисунок, как правило, нечеткий. На поверхности проявляющей краски видна небольшая выпуклость по всей линии рисунка. После удаления краски на поверхности детали заметна тонкая полоса коричневого или темно-коричневого цвета, трудноудаляемая с помощью органических растворителей. При повторном контроле после удаления этой полосы с поверхности индикаторный рисунок не образуется.

Вспомогательным приемом для анализа характера индикаторного рисунка является осмотр поверхности детали с применением оптических приборов после удаления проявляющей краски. При этом краску удаляют ацетоном. Такой осмотр позволяет определить наличие в зоне контроля оставшихся поверхностных загрязнений, заусенцев, рисок, относительно крупных раскрытых трещин. Однако мелкие дефекты, не видимые невооруженным глазом, при осмотре с применением оптических приборов могут быть не обнаружены. Поэтому по результатам этого осмотра не всегда можно сделать окончательный вывод о наличии или об отсутствии дефекта.

Если в зоне контроля обнаружены следы загрязнений, их удаляют с помощью смывок или растворителей, деталь промывают ацетоном, сушат и проводят повторный контроль. При анализе вновь выявленного индикаторного рисунка обращают внимание на те же дополнительные признаки, что и при первом контроле. В сложных случаях прибегают к контролю детали каким-либо дублирующим методом.

§ 3.8. Типичные ошибки при контроле цветным методом

Результаты контроля КЦ методом зависят от правильности выполнения каждой технологической операции. Но наиболее важной операцией, от качества выполнения которой в наибольшей степени зависит достоверность контроля, является предварительная очистка поверхности. При контроле деталей КЦ методом допускают в основном следующие ошибки:

— не полностью удаляют лакокрасочные покрытия и поверхностные загрязнения; нередко для неопытного дефектоскописта поверхность промытой детали кажется чистой, но на самом деле деталь может иметь следы грунтовки, краски, тонкие пленки лака, клея, смолистых отложений; при нанесении проникающей жидкости эти вещества окрашиваются в красный цвет, а после нанесения проявляющей краски они образуют рисунки ложных дефектов или создают окрашенный фон, маскирующий рисунок действительных дефектов;

— после удаления лакокрасочного покрытия смывками не промывают детали растворителем марки 645, а затем ацетоном; при этом полости дефектов остаются заполненными малолетучими веществами (формальгликолем, толуолом, нафталином, парафином и др.), которые препятствуют выявлению дефектов КЦ методом;

— после удаления лакокрасочного покрытия смывкой АФТ-1 детали вместо растворителя марки 645 и ацетона промывают бензином Б-70; бензин, смешиваясь с остатками смывки в полостях дефектов, вызывает коагуляцию и выпадание коллоксилина — компонента смывки АФТ-1; полости дефектов загрязняются образовавшимися продуктами;

— детали от загрязнений и лакокрасочных покрытий необоснованно очищают шлифовальной шкуркой вместо рекомендуемых растворителей; как отмечалось ранее (см. § 3.5), при такой очистке полости дефектов заполняются металлической и абразивной пылью, частицами загрязнений, снимаемых с поверхности детали; при очистке деталей из материалов с твердостью менее 40 HRC полости дефектов перекрываются тонким слоем деформированного материала; поэтому после очистки шкуркой дефекты могут быть не обнаружены;

— для обезжиривания применяют растворители марок 645, 646, 647, Р-4, Р-5 и другие без последующей промывки ацетоном и выдержки на воздухе в течение 15—20 мин; это приводит к заполнению полостей трещин малолетучими веществами — компонентами растворителей, которые препятствуют проникновению в трещины красной проникающей жидкости и снижают чувствительность контроля;

— красную проникающую жидкость наносят в один слой; при этом полости дефектов не полностью заполняются ею; после нанесения проявляющей краски контакт между нею и жидкостью возникает не сразу, что снижает скорость проявления дефектов; насыщенность окраски индикаторного рисунка уменьшается;

— для удаления с поверхности деталей красной проникающей жидкости ошибочно используют чистый керосин, бензин, ацетон или смывки вместо рекомендуемой жидкости МКС; при такой обработке детали красная проникающая жидкость удаляется из полостей дефектов;

— красную проникающую жидкость удаляют с поверхности деталей не жидкостью МКС, а резинками; при этом полости дефектов перекрываются мелкой резиновой и абразивной пылью; кроме того, на поверхности детали остаются следы засохшей неудаленной проникающей жидкости, которые создают индикаторные рисунки ложных дефектов и окрашенный фон;

— не перемешивают белую проявляющую краску перед нанесением ее на детали или при переливании из емкостей, в которых она хранится; за время хранения пигмент краски оседает, краска становится прозрачной, не образует белого фона на детали;

— белую проявляющую краску наносят кистью многократно в несколько слоев; рисунок выявляющихся дефектов при этом смазывается или исчезает совсем;

— детали с целью обнаружения дефектов осматривают сразу же после нанесения белой проявляющей краски, когда процесс проявления мелких и узких трещин находится в начальной стадии; только грубые дефекты проявляются сразу после нанесения краски; осматривать лопатки турбины и компрессора и некоторые другие детали с целью выявления дефектов следует не менее чем через 1 ч после нанесения краски;

— неправильно проверяют или вообще не проверяют качество дефектоскопических материалов на контрольных образцах; вследствие этого контроль деталей может выполняться некондиционными материалами.

§ 3.9. Особенности контроля некоторых деталей

Особенности контроля некоторых деталей КЦ методом обусловлены формой детали, свойствами ее материала или положением в конструкции ЛА. Так, например, особенности контроля шлиц полуосей стоек шасси вызваны сложной формой поверхности проверяемого участка. Проникающую жидкость удаляют только жесткой кистью, смоченной очищающей жидкостью МКС. Затем зону контроля протирают сухой чистой ветошью, перемещая ее вдоль шлиц и обращая внимание на полное удаление жидкости из галтелей у основания шлиц. Белую проявляющую краску наносят только распылителем.

Незачищенные сварные швы, выполненные дуговой, газовой или газоэлектрической сваркой, отличаются сложной нерегулярной формой поверхности. Такие швы перед контролем промывают с применением жестких волосяных щеток или кистей. Проникающую жидкость удаляют с поверхности шва жесткой кистью, смоченной жидкостью МКС. Затем зону контроля протирают сухой ветошью, кратковременно обдувают сжатым воздухом и снова протирают. Проявляющую краску наносят также распылителем.

Аналогично контролируют поверхность втулок и валов с винтовыми канавками, резьбу болтов, винтов, шпилек и других деталей. При поиске индикаторного рисунка трещин усталости, образующихся обычно во впадинах резьбы, необходимо иметь в виду возможность наличия рисунка на выступах резьбы, образованного поверхностными повреждениями металла, которые появляются при изготовлении детали (рис. 3.21 и 3.22).

Особенности контроля магниевых деталей обусловлены низкой коррозионной стойкостью материала. Вследствие этого магниевые детали после удаления лакокрасочного покрытия и особенно после травления не допускается оставлять на воздухе длительное время. Очищенные детали сразу же контролируют, после чего принимают меры по защите их от коррозии: оксидируют, наносят лакокрасочное покрытие или консервационную смазку. Особенностью конт-

роля магниевых деталей является также длительная выдержка от момента нанесения проявляющей краски до осмотра — не менее 1 ч. Это вызвано тем, что полость трещины, как правило, заполнена продуктами окисления металла.

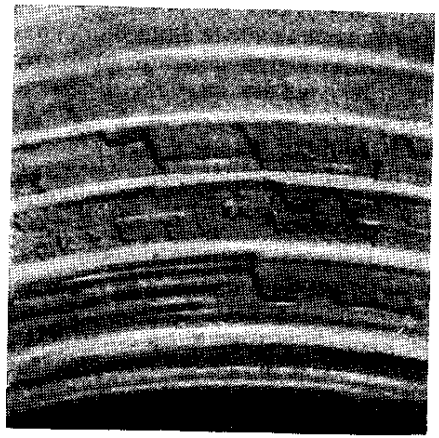


Рис. 3.21. Надрывы материала резьбы штуцера гидросистемы, образовавшиеся при ее нарезании (4-кратное увеличение)

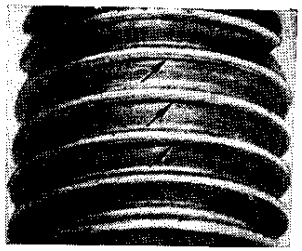


Рис. 3.22. Повреждения материала на выступах резьбы болта, образовавшиеся при ее накатывании (10-кратное увеличение)

Особенности контроля торцов дисков и замков лопаток ротора турбины на расстыкованном самолете обусловлены тем, что зоны контроля прилегают непосредственно к зазорам между деталями. Поэтому при контроле необходимо ограничивать попадание очищающей жидкости МКС в зазоры и принимать меры к удалению из них случайно попавшей жидкости. Для этого проникающую жидкость удаляют ветошью, лишь слегка смоченной МКС. Затем зону контроля протирают сухой чистой ветошью, кратковременно обдувают сжатым воздухом и снова протирают ветошью для удаления потеков МКС. Проявляющую краску наносят распылителем.

При контроле выходных кромок лопаток турбин на расстыкованном самолете на корпус двигателя устанавливают экран из листового материала, предохраняющий неконтролируемые лопатки от случайного попадания красок и жидкостей. Проникающую жидкость наносят на семь-восемь лопаток, видимых в рамке экрана. Затем с них удаляют проникающую жидкость в соответствии с общими рекомендациями по контролю. Проявляющую краску наносят распылителем. После этого, повернув ротор, так же обрабатывают соседние семь-восемь лопаток.

При контроле выходных кромок лопаток турбин на нерасстыкованном самолете лопатки также контролируют группами, но экран не применяют. Белую проявляющую краску наносят мягкой волосяной кистью одинарным ровным слоем. Кисть располагают примерно под углом 45° к контролируемой поверхности. Повторное нанесение проявляющей краски не допускается. Зимой двигатель предварительно прогревают. Операции по контролю начинают после остывания лопаток до температуры 30—40° С (температуру проверяют на ощупь).

Летом компоненты, входящие в состав дефектоскопических материалов, испаряются более интенсивно и при контроле лопаток на нерасстыкованном самолете появляется опасность отравления ими. В связи с этим контроль лопаток проводят в два-три приема. Дефектоскопист периодически покидает реактивную трубу на 10—15 мин. После нанесения проявляющей краски на группу лопаток (20—30 шт.) проводят холодную прокрутку двигателя для удаления паров растворителей.

§ 3.10. Рабочее место и принадлежности. Техника безопасности

Контроль деталей КЦ методом проводят на стационарных рабочих местах, оборудуемых в помещении ТЭЧ, цехах АТБ, в ангаре, автомобиле, а также непосредственно в конструкции ЛА или на временном рабочем месте около него. На стационарном рабочем месте устанавливают стол, оборудованный местной вытяжной вентиляцией. Для освещения применяют люминесцентные лампы дневного света или лампы накаливания, перекрытые органическим или силикатным матированным или молочным стеклом. В дополнение к стационарным осветителям применяют боковые подвижные осветители на кронштейнах. Это позволяет равномерно освещать детали сложной формы, не создавая в поле зрения резких теней. Все осветители должны иметь взрывозащищенное исполнение (искробезопасное, повышенной надежности против взрыва, взрывонепроницаемое и т. д.).

Вентиляция рабочего места должна быть устроена так, чтобы пары растворителей и аэрозоля распыляемой краски не попадали в помещение и в зону расположения дефектоскописта. Местный отсос выполняют в виде камеры, бокового зонта, бортового отсоса или вентиляционной щели. В рабочей зоне отсасываемый воздух должен перемещаться в горизонтальном направлении от дефектоскописта или вниз.

Рабочее место обеспечивают сжатым воздухом для питания краскораспылителя. Для осмотра деталей применяют набор луп различного увеличения или используют бинокулярный микроскоп (например, МБС-2), установленный на кронштейне. При работе с дефектоскопическими материалами оптическую головку микроскопа убирают из зоны работы поворотом кронштейна и зачехляют.

Рабочее место обеспечивают также набором емкостей с дефектоскопическими материалами, пеналами для мягких и жестких кистей, краскораспылителями, полками или ящиками для размещения деталей до и после контроля, секциями или гнездами для свежей и использованной ветоши и контрольными образцами для

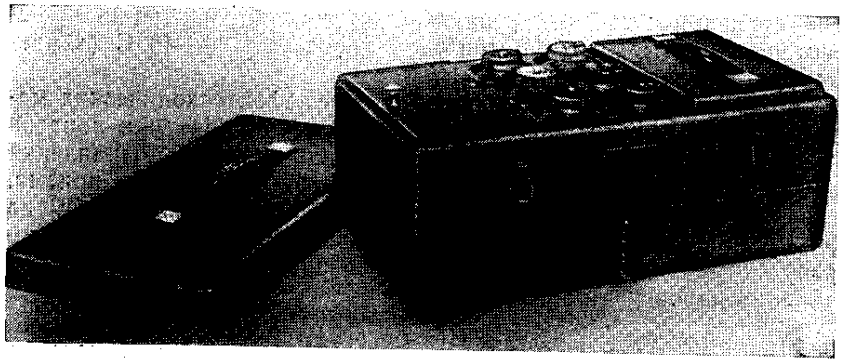


Рис. 3.23. Переносный дефектоскоп ДМК-4

проверки качества дефектоскопических материалов. При наличии переносных дефектоскопов ДМК-4 или У-ДМК-5 на стационарном рабочем месте используют комплектующие их принадлежности. Эти же дефектоскопы или другие переносные наборы применяют на временных рабочих местах, оборудуемых около ЛА.

При контроле деталей в конструкции ЛА применяют переносный дефектоскоп ДМК-4 (рис. 3.23). Он выполнен в виде чемодана, в котором размещены дефектоскопические материалы и принадлежности. Дефектоскоп снабжен малым чемоданом, который используют для контроля лопаток без отстыковки реактивной трубы или для контроля других деталей в труднодоступных местах ЛА. В нем размещены четыре расходные емкости (по 0,1 л каждая) с дефектоскопическими материалами, пеналы с кистями, контрольные образцы и складные карманные лупы ЛП1-4$^{\times}$ и ЛП1-7$^{\times}$. Кроме предметов, размещенных в малом чемодане, в комплект дефектоскопа входят: емкости объемом по 0,5 л и по 0,25 л для хранения запаса дефектоскопических материалов; краскораспылитель 0-37; техническая документация; две дефектограммы, снятые с контрольных образцов; переносная лампа ПЛ-64; технологическая ветошь и резиновые медицинские перчатки. Габаритные размеры дефектоскопа 430×250×210 мм.

Дефектоскоп У-ДМК-5 по конструкции аналогичен дефектоскопу ДМК-4. Он содержит в основном те же принадлежности и состоит из большого чемодана и малого, размещаемого в большом. Дефектоскоп У-ДМК-5 по сравнению с ДМК-4 более компактен, снабжен емкостями четырехугольного сечения, что позволило лучше использовать объем дефектоскопа и увеличить количество емкостей (5 шт. по 0,5 л и 6 шт. по 0,1 л). Дополнительно в дефектоскоп У-ДМК-5 входят: электрический краскораспылитель «Ореол-5»; лупы налобная БЛ-2 и телескопическая ЛПШ-474 (полевой вариант); цанговый удлинитель, служащий насадкой для ручек кистей при работе в труднодоступных местах; запасные кисти (20 шт.); пенал с запасными частями. Габаритные размеры дефектоскопа У-ДМК-5 550×260×200 мм.

Переносный аэрозольный комплект КД-40ЛЦ предназначен для контроля деталей в полевых, цеховых и лабораторных условиях цветным, люминесцентным или люминесцентно-цветным методами. Комплект имеет разборные аэрозольные баллоны, которые можно многократно заряжать на зарядном стенде. Баллоны скомплектованы в три переносных набора. Один из наборов обеспечен электроподогревателем, что позволяет применять его для контроля деталей при температуре окружающей среды до минус 40° С. В комплект входит ультрафиолетовый облучатель. Зарядный стенд комплекта устанавливают в стационарных условиях и подключают к сети (или баллону) сжатого воздуха с давлением не менее $6 \cdot 10^5$ Па и к электросети переменного тока напряжением 127 или 220 В. Стенд позволяет заряжать баллоны дефектоскопическими материалами и фреоном.

Заполненные аэрозольные баллоны постоянно готовы к применению и могут распылять материалы без потребления сжатого воздуха и электроэнергии. В переносных наборах кроме баллонов размещены вспомогательные принадлежности: кисти, лупы, переносная лампа, запасные распылительные головки, ветошь.

При контроле КЦ методом выделяются пары легколетучих компонентов дефектоскопических материалов (ацетона, бензина и т. д.), проникающие в организм человека через органы дыхания. Пары растворителей при концентрациях, превышающих предельно допустимые, а также растворители, попадающие в организм через кожу при непосредственном контакте с ней, оказывают на человека вредное действие. Органические растворители и их пары, кроме того, взрыво- и пожароопасны. Поэтому при контроле деталей КЦ методом необходимо строго соблюдать правила техники безопасности.

При выполнении работ с жидкостями и красками работающий должен находиться в потоке чистого воздуха.

При контроле деталей в конструкции ЛА, когда воздухообмен затруднен, следует применять фильтрующий противогаз марки «А», кислородные приборы КИП-5, РКР-3 или же шланговые противогазы ПШ-1, ПШ-2, маски и другие индивидуальные защитные средства органов дыхания. При контроле лопаток турбин на самолетах без использования средств защиты органов дыхания необходимо устанавливать самолет реактивным соплом с наветренной стороны. Для более интенсивного удаления паров растворителей при работе в удлинительной трубе можно применять воздушный подогреватель (без включения горелки) или пылесос;

время пребывания контролера в удлинительной трубе должно быть по возможности кратким.

Все работы по КЦ контролю необходимо проводить в спецодежде (халаты, хлорвиниловые нарукавники, фартуки). Для защиты рук нужно применять специальные защитные мази (пасты) или бензомаслостойкие перчатки.

Наиболее распространенными защитными средствами для кожи рук являются казеиновая паста и мазь со стеариновой кислотой. В состав казеиновой пасты входят (в процентах по массе): казеин — 19,7; спирт этиловый 90%-ный — 58,7; глицерин — 19,7; аммиак 25%-ный — 1,9. Для приготовления этой пасты необходимо замочить казеин в воде, выдержать для набухания в течение 12—20 ч, затем излишки воды отжать, казеин нагреть на водяной бане до 60—70° С и, помешивая, добавить аммиак, глицерин и этиловый спирт.

В состав стеариновой мази входят (также в процентах по массе): стеариновая кислота — 18,7; сода — 1,9; глицерин — 5,7; вода — 73,7. Для приготовления этой мази следует расплавить стеариновую кислоту, растворить в воде соду и глицерин и подогреть раствор до температуры расплавленной стеариновой кислоты. Затем горячий раствор медленно влить в расплавленную кислоту и помешивать мазь, растирая образующиеся комочки, до охлаждения.

Перед началом работы пасту (или мазь) необходимо нанести на сухие и чистые руки, растирая ее по всей поверхности кожи. После подсыхания пасты в течение нескольких минут до образования тонкой пленки ее наносят снова так, чтобы не было непокрытых мест кожи. После подсыхания второго слоя пасты можно приступать к работе.

Руки, защищенные мазями или перчатками любого типа, не допускается погружать в любой органический растворитель. В процессе работы защитную пленку мази на руках следует периодически обновлять, нанося мазь на участки кожи рук, с которых она быстро стирается. При пользовании резиновыми перчатками руки необходимо предварительно покрыть тальком или смазать вазелином.

Расходные емкости для дефектоскопических материалов должны иметь плотно закрывающиеся крышки. На каждой емкости должны быть четкие надписи, указывающие их содержимое.

Использованную ветошь и отработанные реактивы необходимо убирать с рабочего места ежедневно.

При работе с дефектоскопическими материалами необходимо строго соблюдать меры противопожарной безопасности. В рабочей зоне контроля **категорически запрещается** курить, применять зажигательные средства и открытый огонь. Для предотвращения искрообразования при работах с жидкостями не допускается соударение стальных деталей.

После окончания работы руки следует мыть теплой водой с мылом или с применением специальных моющих паст и смывающих составов. Применение для этого керосина, бензина, растворителей и их смесей **запрещается.** При сухости кожи рук после работы следует применять глицерин, вазелин, ланолин или жирные витаминизированные кремы.

Все лица, допущенные к выполнению работ по КЦ контролю, обязательно проходят инструктаж по технике безопасности. При этом они должны быть ознакомлены с правилами применения средств защиты органов дыхания и кожи от воздействия паров и жидкостей.

Глава 4

МАГНИТОПОРОШКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

§ 4.1. Сущность и задачи магнитопорошкового контроля

Магнитопорошковый метод основан на обнаружении магнитных полей рассеяния над дефектами с помощью ферромагнитных частиц. Если по кабелю *2* (рис. 4.1), проходящему через полую деталь *1*, пропустить электрический ток *I*, то возникший магнитный поток замкнется по детали. В местах трещин он выходит за пределы детали, образуя неоднородное магнитное поле рассеяния *4* и местные магнитные полюсы *N* и *S*. Наибольшая плотность магнитных силовых линий наблюдается непосредственно над трещиной (или над другой несплошностью) и уменьшается с удалением от нее.

Для обнаружения несплошности на поверхность детали наносят магнитный порошок, взвешенный в воздухе (сухим способом) или в жидкости (мокрым способом). На частицу в поле рассеяния будут действовать сила поля рассеяния $F_э$ (рис. 4.1, б), направленная в область наибольшей плотности магнитных силовых линий, т. е. к месту расположения трещины; сила тяжести $F_т$, сила выталкивающего действия жидкости (дисперсионной среды) $F_А$, сила трения $F_{тр}$, а также силы электростатического $F_э$ и магнитного $F_м$ взаимодействия, возникающие между частицами. В магнитном поле частицы намагничиваются и соединяются в цепочки, 5 и 6. Под действием результирующей силы $F_р$ частицы притягиваются к трещине и накапливаются над ней, образуя скопление порошка — индикаторный рисунок. По виду осевшего порошка судят о характере несплошности и принимают решение о браковке детали.

Магнитопорошковый метод (МП) является основным для обнаружения дефектов материала в деталях авиационной техники, изготовленных из магнитных сталей. В эксплуатации он используется для контроля деталей как снятых, так и непосредственно на самолете при наличии свободного доступа к ним для размещения намагничивающих устройств, нанесения магнитной суспензии и осмотра. Этим методом контролируют детали, имеющие некоторую наработку, а также вновь изготовленные или восстановленные при войсковом ремонте.

Магнитопорошковый метод применяют для выявления дефектов металла, выходящих на поверхность детали (в том числе при

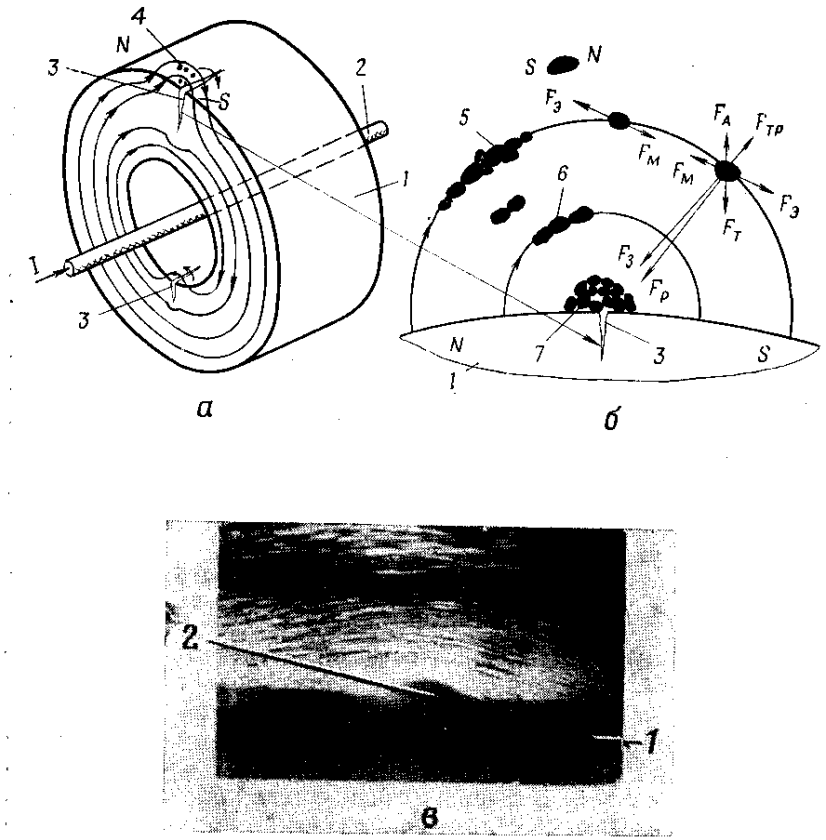


Рис. 4.1. Схема образования магнитного поля рассеяния над трещиной (*а*); схема сил, действующих на частицу в поле рассеяния трещины (*б*) и *в* — участок *7* увеличено в 25 раз:

а, б: *1* — деталь; *2* — кабель с током; *3* — трещины; *4* — поле рассеяния; *5* и *6* — цепочки из частиц порошка; *7* — порошок над трещиной *в*: *1* — деталь; *2* — порошок над трещиной

наличии покрытия толщиной до 30 мкм), и относительно крупных дефектов, расположенных в поверхностном слое на глубине до 1 мм. При контроле могут быть выявлены трещины различного происхождения, закаты, непровары и другие дефекты, распространяющиеся в глубь металла под углом более 20—30° к поверхности детали.

§ 4.2. Физические основы намагничивания материала

Для намагничивания деталей при МП контроле используются магнитные поля, возникающие между полюсами электромагнита, в соленоидах, вокруг проводника с током или при пропускании тока непосредственно по детали. Рассмотрим основные величины, применяемые при расчете режимов намагничивания и размагничивания.

1) Магнитная индукция B — векторная величина, характеризующая интенсивность и направление магнитного поля в каждой его точке. Магнитная индукция зависит от магнитных свойств материала контролируемой детали; измеряется в теслах (Т); 1 Т $=10^4$ Гс.

2) Магнитный поток Φ — величина, равная в однородном магнитном поле произведению магнитной индукции на площадь поперечного сечения магнитопровода: $\Phi = Bs$; измеряется в веберах (Вб).

3) Напряженность магнитного поля H — векторная величина, характеризующая интенсивность и направление магнитного поля в каждой точке без учета магнитных свойств среды; измеряется в амперах на метр (А/м); 1 А/м $=\frac{1}{80}$ Э (эрстед).

4) Магнитная проницаемость μ — величина, характеризующая способность материалов намагничиваться; измеряется в генри на метр (Гн/м).

5) Относительная магнитная проницаемость $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ $\left(\text{где } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\right)$ — магнитная проницаемость вакуума — у ферромагнитных материалов достигает десятков тысяч. К таким материалам относятся железо, никель, кобальт и некоторые сплавы металлов.

Ферромагнитные свойства металлов обусловлены внутренними молекулярными токами, в основном вращением электронов вокруг собственной оси. В ферромагнитных телах в пределах малых областей, так называемых доменов, магнитные моменты молекулярных токов имеют одинаковое направление, поэтому домены оказываются самопроизвольно намагниченными. Объем домена составляет около 10^{-3} см^3. При отсутствии внешнего магнитного поля в детали магнитные поля доменов направлены произвольно и компенсируют одно другое. Суммарное магнитное поле доменов и намагниченность детали J в этом случае равны нулю, ~~(рис. 4.2, а)~~.

Если на деталь действует внешнее поле напряженностью H, то под его влиянием направление полей отдельных доменов устанавливается по направлению внешнего поля; одновременно изменяются границы между доменами. В результате образуется суммарное магнитное поле доменов, и в детали устанавливается максимальная намагниченность J_m (рис. 4.2, б). При снятии поля

($H=0$) происходит частичная дезориентация магнитных полей доменов. В результате намагниченность детали уменьшается до остаточной намагниченности J_r (рис. 4.2, в).

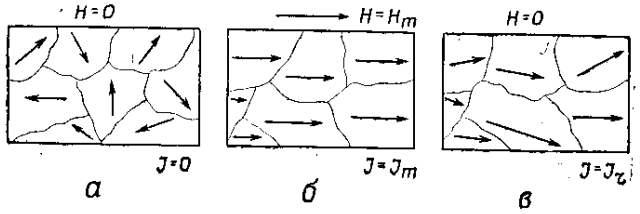


Рис. 4.2. Направления намагниченности доменов в детали:

а — размагниченной; *б* — намагниченной; *в* — намагниченной до остаточной индукции

Намагниченность материала характеризует степень согласованной ориентировки доменов. Магнитное поле доменов накладывается на внешнее магнитное поле, образуя результирующее магнитное поле в детали. Индукция результирующего поля равна сумме индукций внешнего поля и индукции молекулярных токов.

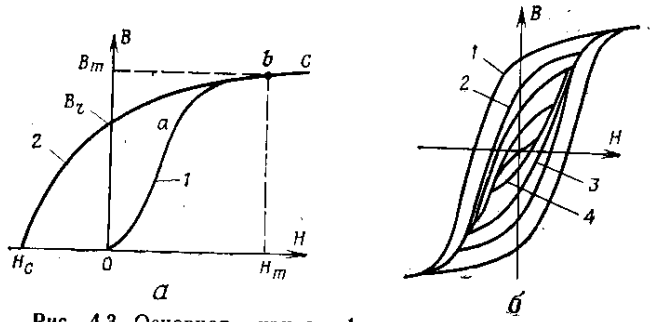


Рис. 4.3. Основная кривая *1* намагничивания, часть предельной петли *2* гистерезиса (*а*) и семейство симметричных петель *1, 2, 3* и *4* гистерезиса (*б*)

При увеличении от нуля напряженности H индукция B в материале изменяется по кривой *1* (рис. 4.3, *а*), которая на участке *Oa* растет интенсивно. Затем скорость нарастания индукции падает. На участке *bc* намагниченность материала практически не увеличивается, так как при этом векторы намагниченности всех доменов материала уже ориентированы в одном направлении по внешнему полю; наступает насыщение. В сталях 30ХГСНА, 30ХГСА, ЭИ-643 насыщение достигается при 8000—10 000 А/м.

Индукция в материале при достижении им магнитного насыщения называется индукцией насыщения B_m.

При циклическом изменении напряженности внешнего магнитного поля от $-H$ до $+H$ и от $+H$ до $-H$ индукция в образце изменяется по замкнутой кривой, симметричной относительно начала координат — гистерезисному циклу. Перемагничивание может происходить по предельной петле *1* или частным петлям гистерезиса *2*, *3*, *4* (рис. 4.3, *б*) в зависимости от амплитуды H.

При снятии внешнего поля (рис. 4.3, *а*) индукция в детали уменьшается от индукции насыщения B_m до остаточной индукции B_r вследствие частичной дезориентации магнитных полей доменов. Чтобы снять остаточную индукцию, нужно к детали приложить поле некоторого значения H_c обратного направления. Напряженность H_c называется коэрцитивной силой.

Материалы, которые после снятия поля оказываются слабо намагниченными (у них H_c<800—960 А/м), называются магнитно-мягкими. Материалы, которые остаются сильно намагниченными после снятия поля, называются магнитно-твердыми (H_c>800—960 А/м).

§ 4.3. Способы магнитопорошкового контроля

Магнитопорошковый (МП) контроль может проводиться способами остаточной намагниченности или приложенного магнитного поля. Последовательность выполнения техно-

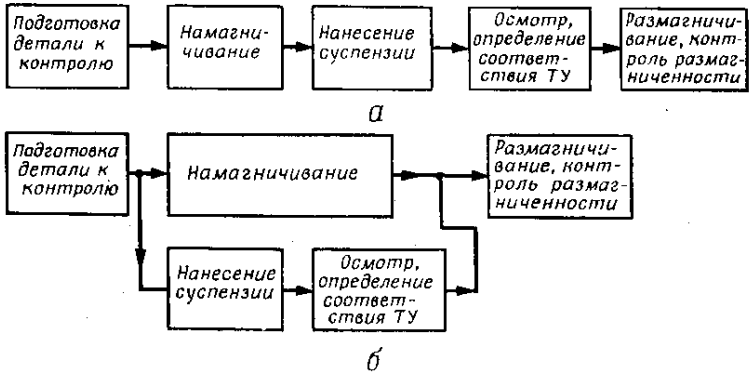


Рис. 4.4. Последовательность выполнения технологических операций при контроле:
а — на остаточной намагниченности; *б* — в приложенном магнитном поле

логических операций при контроле на остаточной намагниченности приведена на рис. 4.4, *а*, а в приложенном поле — на рис. 4.4, *б*.

При проверке способом приложенного поля операции намагничивания, нанесения суспензии и осмотр выполняют одновременно.

Контроль в приложенном поле проводят в следующих случаях:

— деталь выполнена из магнитно-мягкого материала (ст. 3; ст. 10; ст. 20; легированные незакаленные стали и др.);

— деталь имеет малое удлинение λ (λ — отношение длины детали l к ее диаметру d); λ<3—5;

— при необходимости проверки небольших участков крупногабаритных деталей (стоек шасси, балок крыла, узлов подвески двигателей и т. д.) с помощью электромагнита.

В остальных случаях применяют способ остаточной намагниченности, при котором легче расшифровать результаты контроля, так как в этом случае порошок в меньшей степени оседает по рискам, наклепу, местам грубой обработки поверхности и по так называемым мнимым (ложным) дефектам. Обеспечивается лучший доступ к деталям в конструкции для осмотра, так как после намагничивания намагничивающие устройства снимают с детали.

§ 4.4. Подготовка детали к контролю

Перед контролем с проверяемых поверхностей деталей удаляют загрязнения, продукты коррозии, нагар, влагу и т. п. Загрязнения снимают жесткими волосяными щетками, деревянными и пластмассовыми скребками, бельевой ветошью, смоченной в бензине, ацетоне, растворителе марки 645, и т. д. Ворсистую ветошь применять не следует, так как она оставляет на деталях ворсинки, на которых задерживаются магнитные частицы, что затрудняет расшифровку результатов контроля. Особенно тщательно нужно очищать от эксплуатационных загрязнений впадины резьбы, галтели болтов и сварные швы. Отверстия, через которые магнитная суспензия может затечь во внутренние полости деталей и узлов (в подшипники, золотниковые пары, редукторы и т. д.), закрывают густой смазкой, ветошью, пленкой.

Участки детали, на которые устанавливают электроконтакты дефектоскопа (при намагничивании пропусканием тока), зачищают мелкой наждачной бумагой и обезжиривают бензином, растворителем 645 или ацетоном для того, чтобы предотвратить прижог детали.

Влагу с детали удаляют обдувкой струей сухого воздуха или протиркой чистой ветошью. Удаление влаги необходимо во всех случаях, если изделие будет проверяться с применением керосиновой или масляной суспензии или сухого магнитного порошка.

Наличие лакокрасочного покрытия толщиной более 30 мкм уменьшает чувствительность контроля. Поэтому лакокрасочное покрытие толщиной более 30 мкм удаляют, применяя для этого растворитель АФТ-1, 645 или ацетон. Не рекомендуется для этого применять металлические щетки, металлические предметы из-за возможности нанесения царапин, которые могут затруднить расшифровку индикаторных рисунков.

Для облегчения контроля деталей с темной поверхностью (при использовании черного магнитного порошка) с целью увеличения контраста на нее наносят из краскораспылителя слой белой нитрокраски (или белой краски, применяемой для цветной дефектоскопии) толщиной 5—10 мкм. При такой толщине поверхность детали «просвечивается» через нанесенный слой краски. Подкрашивание облегчает также контроль деталей с грубо обработанной поверхностью.

§ 4.5. Способы намагничивания. Виды применяемых токов

При МП контроле в эксплуатации применяют полюсное, циркулярное, параллельное и контактное намагничивание, схемы которых показаны на рис. 4.5.

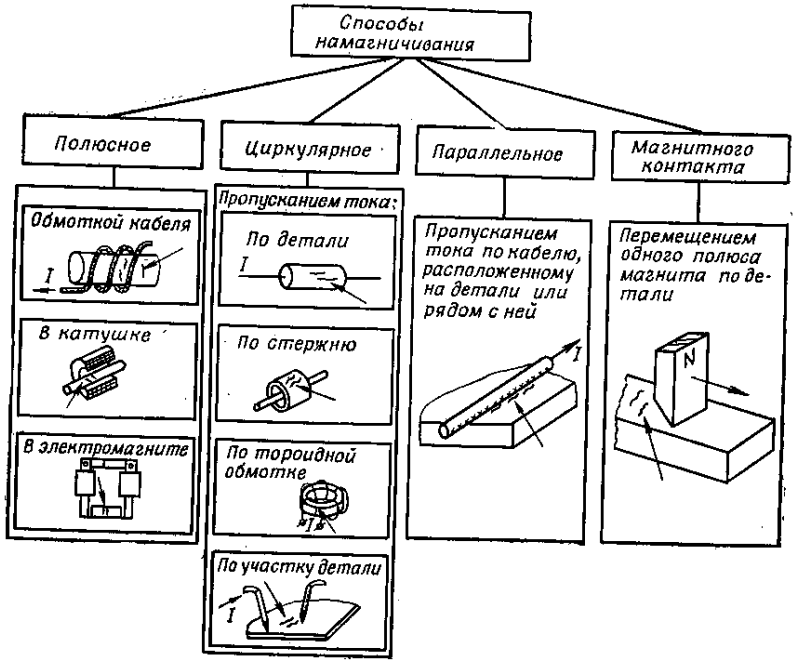


Рис. 4.5. Способы намагничивания деталей при магнитопорошковом (МП) контроле (стрелками показано возможное расположение трещин)

В случае полюсного намагничивания контролируемую деталь обматывают кабелем, помещают в катушку или зажимают между полюсными наконечниками электромагнита. При этом магнитные силовые линии частично проходят по детали, а частично по воздуху; на детали образуются магнитные полюсы, которые остаются

после снятия намагничивающего поля (рис. 4.6). В зависимости от того, совпадает направление силовых линий намагничивающего поля с продольной осью детали *1* (рис. 4.7, *а*) или силовые линии направлены перпендикулярно к ней (рис. 4.7, *б*), различают продольное и поперечное полюсное намагничивание. Продольное намагничивание применяют для обнаружения трещин, распространяющихся перпендикуляно, а поперечное — для обнаружения трещин, распространяющихся вдоль продольной оси детали.

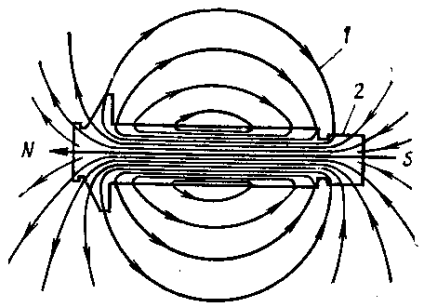


Рис. 4.6. Схема магнитных силовых линий *1* вокруг полюсно намагниченной детали *2*

Если длинную деталь проверяют обмоткой кабеля, то контроль проводят по участкам. За контролируемый участок следует считать часть детали, охваченную витками кабеля (катушки). При проверке концов детали последний виток кабеля должен быть наложен непосредственно у торца детали.

При циркулярном намагничивании ток пропускают по детали или по ее участку, по тороидной обмотке или по стержню (ка-

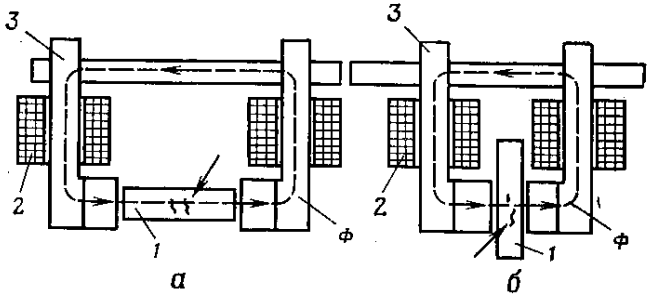


Рис. 4.7. Виды полюсного намагничивания:

а — продольное; *б* — поперечное; *1* — деталь; *2* — катушка; *3* — магнитопровод; *Ф* — магнитный поток (стрелками показано расположение трещин)

белю), на который надета полая деталь. При этом силовые линии намагничивающего поля имеют вид концентрических окружностей (см. рис. 4.1). В цилиндрической детали без дефекта силовые линии весь свой путь проходят по детали, магнитных полюсов на ней не образуется. При контроле деталей сложной формы возможно образование полюсов на выступающих частях детали. Циркулярное намагничивание применяют для обнаружения дефектов, расположенных вдоль продольной оси детали или вдоль линии, проведенной через точки установки электроконтактов на детали.

Таблица 7

Способы контроля и схемы намагничивания деталей авиационной техники

Контролируемые участки (заштрихованы) и схемы расположения трещин (указаны стрелками)	Тип дефектоскопа, способ контроля *	Схема намагничивания
1. Цилиндрическая поверхность, примыкающая к крестовине рамы тележки шасси	МД-50П, ОН	6 витков кабеля сечением 50 мм²
2. Внутренние поверхности отверстий пакета, состоящего из пластин *1—5*, в месте стыка задней стенки с главной балкой крыла	ПМД-70 или 77ПМД-3М, ОН	Кабель сечением 3—10 мм²
3. Галтельный переход от траверсы к цилиндру *1* амортизационной стойки шасси	77ПМД-3М, ОН	5 витков кабеля *2*, намотанные на ферромагнитную пластину *3*, замыкающую магнитный поток

* Сокращенное обозначение способов контроля в табл. 7: ОН — контроль способом остаточной намагниченности; ПП — контроль способом приложенного магнитного поля.

Продолжение

Контролируемые участки (заштрихованы) и схемы расположения трещин (указаны стрелками)	Тип дефектоскопа, способ контроля	Схема намагничивания
4. Внутренняя и внешняя часть проушины бугеля	ПМД-70, ОН	8 витков кабеля сечением 10 мм²
5. Сварные швы и прилегающие к ним участки подкоса шасси вертолета	ПМД-70 или 77ПМД-3М, ОН	Катушка
6. Участок у смазочного отверстия карданного болта шасси	ПМД-70 или 77ПМД-3М, ОН	Катушка
7. Галтельный переход у шлиц оси передней стойки шасси	ПМД-70 или 77ПМД-3М, ПП	Катушка

Продолжение

Контролируемые участки (заштрихованы) и схемы расположения трещин (указаны стрелками)	Тип дефектоскопа, способ контроля	Схема намагничивания
8. Внутренняя поверхность ушка и переходы к боковым поверхностям качалки	ПМД-70, ОН	8 витков кабеля сечением 10 мм²
9. Внутренняя поверхность ушка и прилегающие к нему участки ушкового наконечника шасси	ПМД-70, ОН	6 витков кабеля сечением 10 мм²
10. Внутренние поверхности ряда отверстий и прилегающие к ним участки на полке главной балки крыла	ПМД-70, ОН	Кабель сечением 3 мм², продетый «змейкой»

Продолжение

Контролируемые участки (заштрихованы) и схемы расположения трещин (указаны стрелками)	Тип дефектоскопа, способ контроля	Схема намагничивания
11. Боковая поверхность полки главной балки крыла, имеющая ряд отверстий	ПМД-70, ОН	Кабель сечением 3 мм², продетый «через край»
12. Сферическая поверхность крышки гидроаккумулятора	77ПМД-3М, ПП	Электромагнит, устанавливаемый последовательно в двух взаимно перпендикулярных направлениях
13. Участки балансира руля высоты по обе стороны от передней кромки	77ПМД-3М, ПП	Электромагнит

Продолжение

Контролируемые участки (заштрихованы) и схемы расположения трещин (указаны стрелками)	Тип дефектоскопа, способ контроля	Схема намагничивания
14. Сварные швы крепления обода шпангоута № 13 к поперечной балке фюзеляжа	77ПМД-3М, ПП	Электромагнит с круглым (*S*) и прямоугольным (*N*) полюсными наконечниками
15. Сварные швы на полувилке передней стойки шасси	ПМД-70, ОН	Электроконтакты, устанавливаемые на расстоянии друг от друга 80—100 мм
16. Сварной шов на цилиндре гидросистемы самолета	ПМД-70, ОН	Электроконтакты, устанавливаемые на расстоянии друг от друга 80—100 мм

Параллельное намагничивание осуществляется кабелем, который располагают параллельно поверхности проверяемого участка детали (см. рис. 4.5). Такой способ позволяет обнаруживать трещины, расположенные параллельно кабелю. Он эффективен при использовании импульсных магнитных полей.

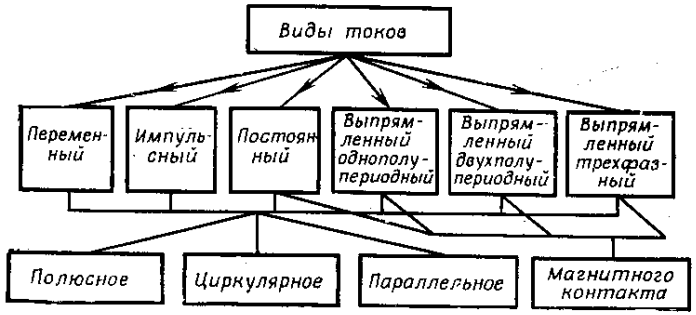


Рис. 4.8. Виды токов, применяемых при различных способах намагничивания

Намагничивание детали способом магнитного контакта осуществляют перемещением по ее поверхности одного полюса электромагнита или постоянного магнита. При этом обеспечивают надежный контакт с проверяемой поверхностью. В местах контакта полюса магнита с деталью происходит локальное намагничивание ее поверхностного слоя в направлении перемещения магнита. Ширина эффективно намагниченной зоны оказывается равной или даже несколько больше ширины зоны контакта, а длина равна расстоянию между начальным и конечным положениями полюса. После намагничивания контролируемого участка магнит убирают с детали, наносят суспензию и осматривают. При этом способе намагничивания выявляются трещины, ориентированные перпендикулярно к направлению перемещения полюса магнита.

При контроле способом магнитного контакта ток в обмотках электромагнита должен быть максимальным. Опытом установлено, что при использовании постоянных магнитов напряженность поля на полюсах должна быть не менее 1000 Э ($8 \cdot 10^4$ А/м).

Примеры намагничивания некоторых деталей приведены в табл. 7. Виды токов, питающих намагничивающие устройства при различных способах намагничивания, показаны на рис. 4.8.

§ 4.6. Определение намагничивающего тока и расчет напряженности поля при контроле с применением кабеля

Определение тока для циркулярного намагничивания (пропусканием кабеля через отверстие в детали) при контроле на остаточной намагниченности проводят по формуле

$$I = \frac{H}{320} D,$$

где D — диаметр той части детали, на которой ищут дефект, мм;
H — напряженность поля, при которой практически наступает насыщение материала, А/м.

Если надо обнаружить дефект на внутренней поверхности детали (рис. 4.9), то в формулу подставляют значение D. Если надо обнаружить дефект на внешней поверхности, то в формулу подставляют значение D_2. При циркулярном намагничивании с использованием тороидной обмотки ток определяют по формуле

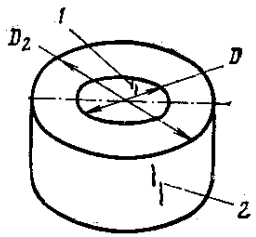


Рис. 4.9. Схема цилиндрической детали с трещинами 1 и 2 на внешней и внутренней поверхностях

$$I = \frac{HD}{320n},$$

где n — число витков.

Если ток I является заданным (случай нерегулируемого тока в дефектоскопе, например в ПМД-70), то расчет сводится к определению числа витков кабеля по формуле

$$n = \frac{HD}{320I}.$$

Полученное дробное значение округляется до целого числа в большую сторону.

Пример. Определить число витков кабеля сечением 10 мм² при контроле на остаточной намагниченности внутренней поверхности отверстия диаметром 10 мм в балке крыла из стали 30ХГСНА (напряженность поля насыщения $8 \cdot 10^3$ А/м, ток дефектоскопа в кабеле сечением 10 мм² — 1000 А).

Решение. Число витков

$$n = \frac{HD}{320} = \frac{8 \cdot 10^3 \cdot 10}{320 \cdot 10^3} = \frac{1}{4} \approx 1.$$

Напряженность поля в соленоиде (А/м) определяется по формуле

$$H = \frac{nI \cdot 10^2}{\sqrt{l^2 + D^2}},$$

где l — длина намотки кабеля, см;
D — диаметр соленоида, см;
n — число витков;
I — ток, А.

§ 4.7. Факторы, влияющие на чувствительность магнитопорошкового метода

Результаты МП контроля в основном зависят от следующих факторов: толщины немагнитного покрытия, направления магнитных линий в детали, скорости снятия магнитного

поля, магнитных свойств порошка, качества суспензии, способов нанесения ее на деталь и др.

Немагнитное покрытие. С увеличением толщины немагнитного покрытия более 30 мкм (рис. 4.10) чувствительность МП метода значительно уменьшается. Это объясняется тем, что напряжен-

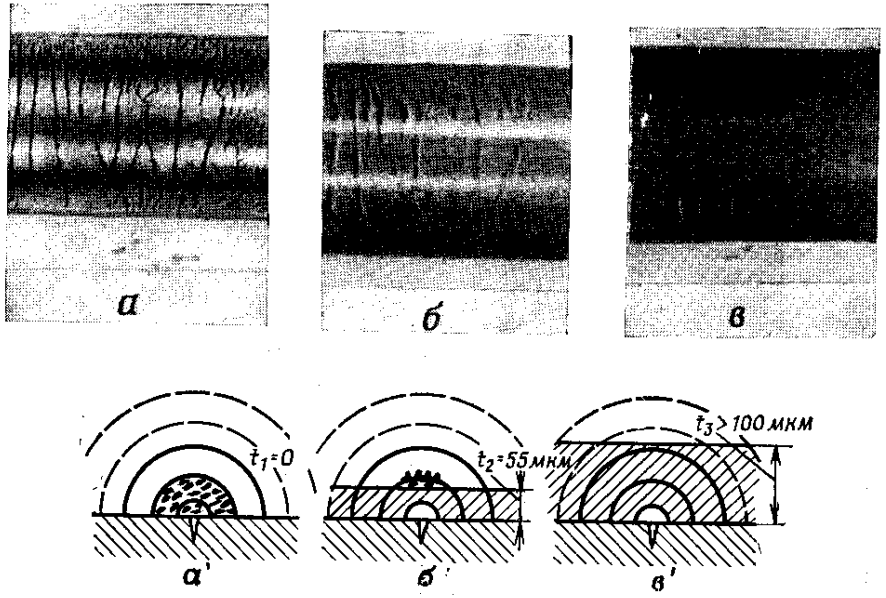


Рис. 4.10. Вид осаждения магнитного порошка (*а*, *б*, *в*) на одной и той же детали с шлифовочными трещинами, имеющей покрытия, и схемы осаждения порошка над трещинами — открытой (*а'*), находящимися под слоем покрытия (*б'*) толщиной 55 мкм и толщиной более 100 мкм (*в'*)

ность поля рассеяния над дефектом быстро убывает при удалении от поверхности детали. На расстоянии 100 мкм затягивающая сила, действующая на частицы порошка, становится настолько незначительной, что частицы практически не притягиваются к дефекту. На рис. 4.10, *б'* видно, что при толщине немагнитного слоя $t_2 = 55$ мкм осаждение порошка имеет вид размытой, неплотной полосы. При толщине 100 мкм осаждения порошка над трещинами не происходит (рис. 4.10, *в'*). Поэтому слой краски толщиной более 30 мкм с проверяемой поверхности при контроле удаляют.

Направление намагничивания. Наибольшая чувствительность достигается, если силовые линии в детали пересекаются с направлением распространения дефектов под углом $\alpha \approx 90°$. Если $\alpha < 20$—30°, то выявляемость дефектов значительно ухудшается. На рис. 4.11 показаны трещины, выявленные в деталях из стали 30ХГСНА при различном угле α. Если неизвестно вероятное направление распространения дефектов, то деталь контролируют

дважды, намагничивая ее в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Форма детали. Индукция при полюсном намагничивании (в приложенном поле) зависит от значения напряженности ре-

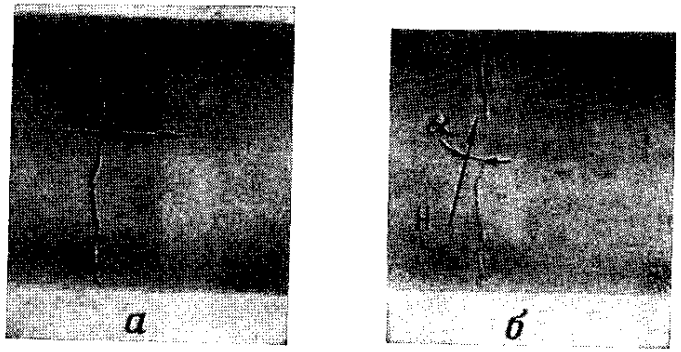


Рис. 4.11. Осаждение магнитного порошка над трещинами при направлении магнитных силовых линий под углом $\alpha \approx 90°$ (*а*) и под углом $\alpha \approx 15°$ (*б*) к трещине

зультирующего поля внутри детали, определяемой по формуле

$$H_i = H_e - NJ,$$

где H_e — внешнее намагничивающее поле;
NJ — размагничивающее поле полюсов детали;
J — намагниченность;
N — коэффициент, называемый размагничивающим фактором.

Из приведенной формулы видно, что, чем больше N, тем меньше напряженность поля H_i и, следовательно, индукция в детали.

Размагничивающий фактор N определяется аналитически или экспериментально. Каждой форме детали соответствует определенное значение N; так, например, для шара $N=0{,}333$, для эллипсоида с отношением осей 2 фактор $N=0{,}73$, для целого кольца $N=0$. Если размагничивающий фактор $N=0$, как для целого кольца, то напряженность поля в нем (в приложенном поле) $H_i = H_e$. Для разрезанного кольца $N_р \neq 0$, поэтому $H_i = H_e - N_р J$. После снятия поля ($H_e=0$) остаточная индукция в разрезанном кольце уменьшится до B_{r_1}, а в целом кольце — до B_{r_2}, причем $B_{r_2} > B_{r_1}$ (рис. 4.12, *а*). Следовательно, дефекты будут лучше выявляться на целом кольце, чем на разрезанном.

Для цилиндрических деталей N тем меньше, чем больше удлинение $\lambda = \frac{l}{d}$ (l — длина детали, d — диаметр). Если форма сечения s детали сложная, то вместо d берут $\sqrt{s}$, тогда $\lambda = \frac{l}{\sqrt{s}}$.

Для уменьшения влияния размагничивающего фактора при контроле короткие детали *1—4* составляют в цепочки так, чтобы λ

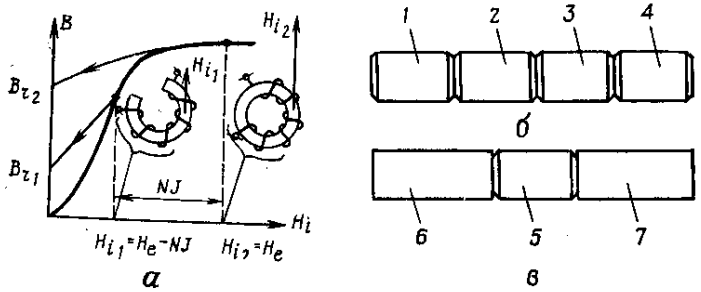


Рис. 4.12. Схемы уменьшения индукции в разрезанном кольце (*а*) и расположения деталей *1—4* в цепочках (*б*), детали *5* между двумя стальными стержнями (удлинителями) *6* и *7* (*в*)

было больше 3—5 (рис. 4.12, *б*). Если контролируемая деталь *5* одна, то ее зажимают между двумя стальными стержнями *6*, *7*, которые в этом случае называют удлинителями (рис. 4.12, *в*).

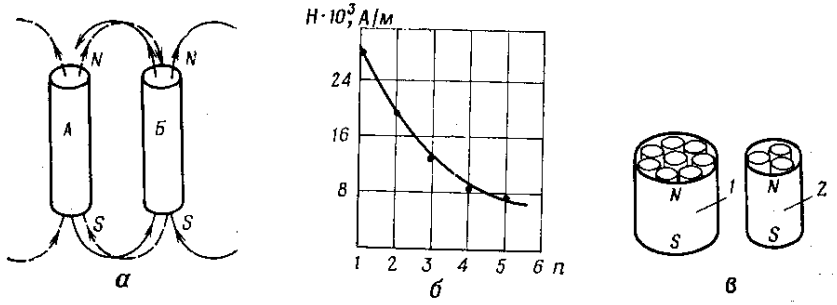


Рис. 4.13. Схема взаимного размагничивания двух полюсно намагниченных деталей *А* и *Б* (*а*), зависимость напряженности на полюсе намагниченного стержня от количества вместе составленных стержней (*б*) и схема расположения воображаемых стержней в толстой *1* и тонкой *2* деталях (*в*)

Действию размагничивающего фактора можно дать следующее физическое объяснение. Магнитное поле детали *А* (рис. 4.13, *а*) направлено навстречу полю детали *Б* и частично размагничивает ее, а магнитное поле детали *Б* частично размагничивает деталь *А* На рис. 4.13, *б* показана зависимость напряженности на конце (полюсе) стержня из стали 30ХГСНА (длиной 150 мм, диаметром 12 мм) от количества стержней, составленных вместе. Полюсно намагниченную деталь большого диаметра можно мысленно представить состоящей из большого числа парал-

лельных стержней (рис. 4.13, *в*), которые размагничивают друг друга. Следовательно, чем больше диаметр детали (при неизменной длине), тем до меньшей остаточной намагниченности намагничивается деталь. Чувствительность метода при контроле на остаточной намагниченности оказывается высокой, если удлинение детали будет более 3—5.

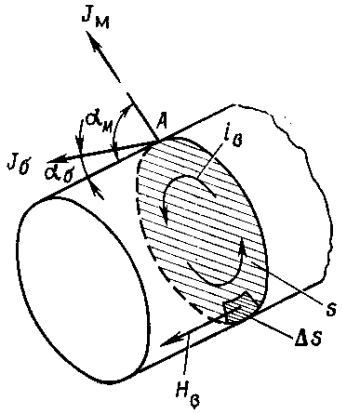


Рис. 4.14. Схема изменения наклона вектора намагниченности в поверхностном слое образца:

$J_м$ и $J_б$ — векторы намагниченности соответственно при медленном и быстром уменьшении поля; $\alpha_м$ и $\alpha_б$ — углы между векторами и образующей образца; $i_в$ — вихревые токи, протекающие в плоскости s; Δs — элементарная площадка; $H_в$ — вектор напряженности вихревых токов в элементарной площадке Δs

Скорость снятия магнитного поля. На качество магнитного контроля на продольной остаточной намагниченности оказывает влияние не только величина намагничивающего поля, но и скорость его снятия. Чем больше эта скорость, тем лучше выявляются дефекты. Этому явлению можно дать следующее объяснение. Результирующее поле вокруг образца, помещенного даже в однородное магнитное поле, всегда неоднородно, так как одна из составляющих этого поля — размагничивающее поле — в различных точках поверхности образца имеет различное значение. Вектор намагниченности $J_м$ в некоторой точке *А* составляет с образующей поверхности образца относительно большой угол $\alpha_м$ (рис. 4.14). При медленном снятии поля уменьшения этого угла практически не происходит. Магнитный поток через цилиндрическую поверхность образца выходит вдоль полости трещин. В результате трещины не выявляются или выявляются плохо.

При намагничивании образца быстро убывающим полем в нем возникают вихревые токи $i_в$, протекающие в плоскостях *s*, перпендикулярных к продольной оси образца. Поэтому векторы $H_в$ к элементарным площадкам Δs будут параллельны поверхности образца. В результате действия векторов $H_в$ вектор намагниченности $J_б$ в поверхностном слое оказывается направленным под небольшим углом $\alpha_б$ к поверхности образца. Теперь магнитный поток пересекает трещины, что обеспечивает высокую чувствительность метода.

Магнитное поле между полюсами электромагнита вследствие больших индуктивности и магнитной вязкости магнитопровода уменьшается медленно даже при практически мгновенном разрыве цепи питания. Поэтому для более быстрого снятия поля при контроле с применением переносного электромагнита необходимо его резко оторвать от проверяемой детали, отнести на расстояние

0,5—0,7 м, а затем выключить ток питания. Это позволяет получить более четкий индикаторный рисунок над дефектом.

Другие факторы, связанные с качеством порошков и суспензий и способами их нанесения, рассмотрены ниже.

§ 4.8. Особенности контроля сварных соединений

Контроль ферромагнитных сварных швов на остаточной намагниченности проводят с помощью электроконтактов или в приложенном поле с помощью электромагнита. Если свар-

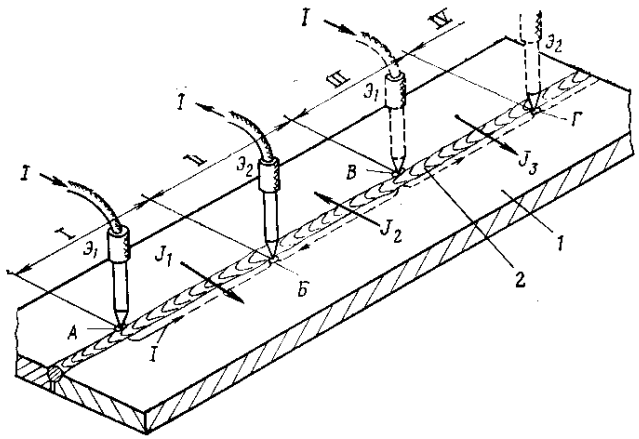


Рис. 4.15. Схема намагничивания сварного шва по участкам:

1 — деталь; *2* — сварной шов

ной шов имеет большую длину, то при контроле на остаточной намагниченности его сначала намагничивают по всей длине последовательно участок за участком, переставляя электроконтакты поочередно в заранее размеченные точки.

Чтобы при намагничивании последующего участка не размагничивался предыдущий, перестановку электроконтактов осуществляют поочередно по следующей схеме. При намагничивании участка *I* сварного шва *2* на детали *1* (рис. 4.15) один электроконтакт $Э_1$ устанавливают в точке *А* на контролируемой детали, а другой $Э_2$ — в точке *Б*. При намагничивании участка *II* электроконтакт $Э_2$ оставляют в точке *Б*, а электроконтакт $Э_1$ устанавливают в точке *В* и т. д. Ток *I*, проходящий по детали на участке *II* сварного шва, будет направлен противоположно току, пропущенному при намагничивании участка *I*. Поэтому направление намагниченности J_1 на участке *I* между электроконтактами противоположно направлению намагниченности J_2 на участке *II*. После на-

магничивания всего сварного шва направления намагниченностей соседних участков будут противоположны. Таким образом, при намагничивании сварных швов по участкам необходимо менять очередность установки электроконтактов, т. е. поочередно менять направление тока, пропускаемого по сварному шву.

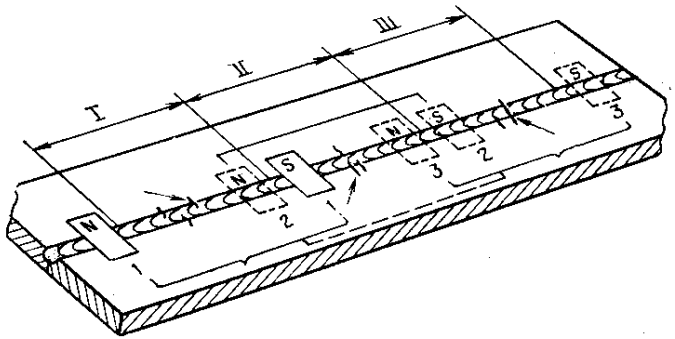


Рис. 4.16. Схема контроля сварного шва по участкам с помощью электромагнита:

I, II, III — контролируемые участки; *1—1, 2—2, 3—3* места установки наконечников электромагнита при контроле соответственно *I, II, III* участков (стрелками показано расположение возможных трещин)

В местах установки электроконтактов, т. е. в местах ввода и вывода тока, участки радиусом 3—5 мм намагничиваются неэффективно, и дефекты на них не выявляются. Поэтому при намагничивании электроконтакты устанавливают рядом со сварным швом.

Контроль сварных соединений с применением электромагнита в приложенном магнитном поле проводят по участкам в такой последовательности:

— размечают сварной шов на контролируемые участки (рис. 4.16); длина контролируемого участка должна быть меньше расстояния между полюсными наконечниками на 1—2 см; оптимальное расстояние между полюсами электромагнита дефектоскопов ПМД-70, У-601-64С, МД-50П составляет 70—100 мм, а дефектоскопа 77ПМД-3М — 100—150 мм;

— устанавливают электромагнит на первый контролируемый участок, обеспечивая хорошее прилегание полюсных наконечников к поверхности детали;

— включают ток в электромагните.

Если при нанесении суспензии происходит интенсивное налипание порошка на проверяемой поверхности детали, то уменьшают ток в электромагните и вновь наносят магнитную суспензию на контролируемый участок. Если после нанесения магнитной суспензии фон из осевшего порошка полностью отсутствует, то это свидетельствует о недостаточной напряженности поля. В этом случае следует увеличить ток в электромагните или уменьшить расстояние между его полюсами. Последовательно переставляя электромагнит по размеченным участкам, аналогично проверяют весь сварной шов.

§ 4.9. Размагничивание деталей

Кроме преднамеренного намагничивания для контроля детали летательного аппарата могут намагничиваться при электродуговой сварке, при случайном контакте с постоянным магнитом или с электромагнитом, при близком нахождении ЛА от места грозового разряда. Детали, подвергающиеся вибрациям или знакопеременным нагрузкам, могут также намагнититься даже в слабом магнитном поле, например в поле Земли. При вибрациях ослабляются силы трения между доменами и облегчается их ориентация в направлении внешнего поля, т. е. облегчается намагничивание. Намагниченные детали ЛА должны быть размагничены, так как в противном случае к ним притягиваются ферромагнитные частицы (продукты износа), которые вызывают повышенный износ трущихся элементов деталей (подшипников, золотников, шестерен, валов и т. д.). Магнитные поля неразмагниченных деталей могут также вызвать значительные ошибки в показании компаса, непредусмотренное срабатывание электромагнитных поляризованных реле, создавать помехи в работе высокочувствительных магнитных усилителей, приборов и элементов автоматики.

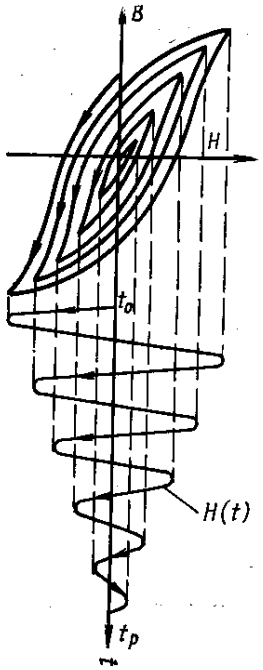


Рис. 4.17. Изменение напряженности H во времени t и индукции B в детали при размагничивании

В условиях эксплуатации добиться полной размагниченности деталей очень трудно. Этого и не требуется. Применяемые способы позволяют размагничивать их до уровня, при котором остаточная намагниченность не вызывает нарушений нормальной работы приборов и агрегатов.

Для размагничивания деталь циклически перемагничивают магнитным полем, напряженность $H(t)$ которого во времени изменяется по направлению и постепенно уменьшается по амплитуде (рис. 4.17). При этом магнитное состояние материала меняется по уменьшающимся петлям гистерезиса. Когда напряженность размагничивающего поля будет равна нулю (момент $t_р$), остаточная индукция B в детали будет минимальной.

Способы размагничивания деталей приведены в табл. 8.

Таблица 8

Способы размагничивания деталей ЛА в эксплуатации

Устройство для размагничивания	Вид тока	Способ уменьшения напряженности магнитного поля, воздействующего на деталь	Дефектоскоп, в котором реализован способ размагничивания
Катушка (соленоид)	Переменный Постоянный * Выпрямленный *, двухполупериодный	Удалением детали из соленоида	77ПМД-3М, ПМД-70, МД-50П, У-601
	Переменный Постоянный * Выпрямленный *, двухполупериодный	Снижением тока до нуля	МД-50П, У-601 ПМД-70, МД-50П, У-601
Электромагнит	Постоянный * Выпрямленный *, двухполупериодный	Удалением электромагнита от детали	77ПМД-3М, ПМД-70, У-601, МД-50
	Постоянный * Выпрямленный *, двухполупериодный	Снижением тока до нуля	ПМД-70, МД-50П, У-601
Кабель	Переменный	Снижением тока до нуля	У-601, МД-50П
Электроконтакты	Импульсный *	Снижением тока до нуля	МД-50П, ПМД-70

* Направления постоянного и выпрямленного токов периодически меняются коммутирующими устройствами дефектоскопов.

При размагничивании крупногабаритных деталей в соленоидах, питаемых переменным током промышленной частоты, вследствие поверхностного эффекта хорошо размагничиваются лишь их наружные слои. Внутренние их части размагничиваются недостаточно полно. Удовлетворительное размагничивание деталей в соленоиде достигается, если начальная напряженность поля при размагничивании не менее $20 \cdot 10^3$—$24 \cdot 10^3$ А/м. Для размагничивания

деталь помещают в соленоид так, чтобы ее продольная ось была примерно параллельна продольной оси соленоида, включают ток, удаляют деталь вдоль продольной оси соленоида на расстояние 0,5—0,7 м в течение 10—15 с и выключают ток в соленоиде.

Трудно размагничивающуюся деталь, извлекая из соленоида, одновременно вращают в разных плоскостях. Требуемая напряженность магнитного поля в соленоиде при размагничивании с вращением в 2 раза меньше, чем без вращения.

Короткие детали при размагничивании в соленоиде, питаемом уменьшающимся током, укладывают одну за другой в цепочки (см. рис. 4.12).

Таблица 9

Технические данные приборов для определения размагниченности деталей

Характеристики приборов	Типы приборов	
	ПКР-1	МФ-20Ф
Питание	Батарейное	220 В, 50 Гц или батарейное
Выполнение схемы	На полупроводниках	
Единицы измерения	Относительные	А/см
Количество поддиапазонов	1	8
Тип преобразователя	Феррозондовый, по схеме градиентометра	Феррозондовый, по схеме градиентометра или полемера
Количество преобразователей	1	6
Диапазон измерения: — напряженности поля	—	8; 10—80 А/см
— градиента	—	0,1—25 А/см
Масса	1,2 кг	4 кг
Габариты	108×110×165 мм	330×270×130 мм

Размагничивание детали пропусканием разнополярных импульсов тока, уменьшающихся по амплитуде, оказывается эффективным, если намагничивание проводилось также импульсным током, так как в этом случае вследствие поверхностного эффекта намагничивается и размагничивается тонкий слой у поверхности детали. Размагничивание проводят по участкам, используя электроконтакты. При автоматическом размагничивании время уменьшения тока от максимального значения до нуля в дефектоскопах ПМД-70 и МД-50П равно 40—50 с. Массивные детали, намагниченные по всему сечению импульсным током, размагнитить не удается.

Размагничивание крупногабаритной детали переменным током с применением кабеля проводят по участкам. Участком для размагничивания считают часть детали, охватываемую витками кабеля. Расстояние между витками должно быть не более двух — пяти диаметров кабеля. Размагничивание начинают с середины детали. Начальное значение тока при размагничивании, как правило, должно быть не менее значения тока, которым намагничивалась деталь; время его уменьшения до нуля — 5—60 с. Воздействие размагничивающим полем только на конец (полюс) детали практически не приводит к уменьшению намагниченности.

Размагничивание длинных деталей с помощью электромагнита проводят последовательно по контролируемым участкам, размеченным при намагничивании. Для этого электромагнит размещают на первом контролируемом участке и устанавливают максимальный ток в его обмотках. Периодически изменяют направление тока с одновременным его уменьшением или удалением электромагнита от детали на расстояние 0,5—0,7 м в течение 10—15 с. Аналогично размагничивают другие участки детали.

Контроль степени размагниченности проводят с применением приборов ПКР-1, МФ-21Ф и др. (табл. 9). В приборе ПКР-1 на шкале нанесен сектор годности; при выходе стрелки из этого сектора деталь считается неразмагниченной.

§ 4.10. Кинетика осаждения порошка над дефектами

При магнитопорошковом контроле ферромагнитные частицы, взвешенные в жидкости или в воздухе, попадая в магнитное поле, намагничиваются и становятся элементарными магнитиками. Сближаясь, намагниченные частицы соединяются в цепочки, ориентирующиеся по магнитным силовым линиям поля. Такое явление называется магнитной коагуляцией.

Магнитная коагуляция имеет место в суспензии при погружении в нее полюсно намагниченной детали. В этом случае частицы, соединенные в цепочки, образуют вокруг детали картину магнитных силовых линий (рис. 4.18).

При контроле в приложенном магнитном поле магнитная коагуляция протекает во время нанесения суспензии под воздействием

поля намагничивающего устройства (электромагнита, катушки и т. д.).

Намагничивание и соединение частиц в цепочки происходит также в поле рассеяния дефекта (см. рис. 4.1).

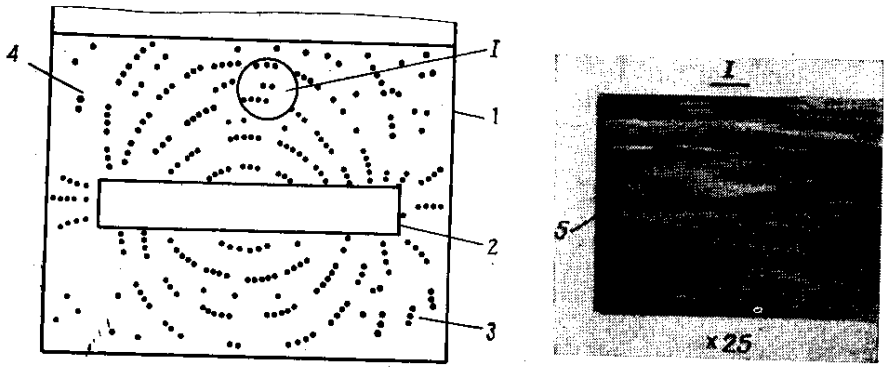


Рис. 4.18. Спектр поля вокруг полюсно намагниченной детали *2*, погруженной в суспензию *4* (*1* — ванночка; *3* — цепочки из частиц порошка; *5* — вид цепочек при увеличении)

С магнитной коагуляцией связаны чувствительность и выявляемость дефектов.

В местах наклепа, рисок, забоин, грубой обработки поверхности и других дефектов возникают магнитные поля рассеяния (рис. 4.19), размеры ρ которых превышают длину цепочек (ρ —

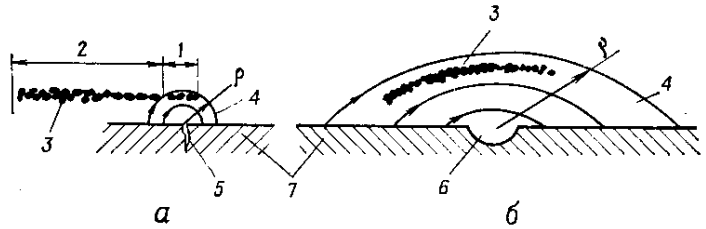


Рис. 4.19. Длинные цепочки *3* из частиц порошка в поле рассеяния трещины (*а*) и риска (*б*) (*1* и *2* — части цепочек, находящиеся в поле рассеяния и вне его; *4* — магнитные силовые линии; *5* — трещина; *6* — риска; *7* — деталь)

расстояние, на котором на частицу действует затягивающая сила, достаточная для притяжения ее к дефекту). В пределах объема, определяемого значением ρ, на каждую частицу цепочки действует составляющая затягивающей силы. Длинные цепочки полностью находятся в поле рассеяния риски (рис. 4.19, *б*). Поэтому под действием результирующей силы длинные цепочки притягиваются к риске и накапливаются над ней.

Над трещинами возникают поля малого объема (рис. 4.19, *а*); размер ρ их на один-два порядка меньше длины цепочек. Поэтому

небольшая часть *1* длинной цепочки находится в поле рассеяния. Часть *2* цепочки находится вне поля рассеяния, и затягивающая сила на нее не действует. Затягивающая сила для длинной цепочки невелика относительно силы тяжести. Такие цепочки под действием силы тяжести выпадают на поверхность детали и образуют фон, который затрудняет расшифровку индикаторных рисунков.

Причинами интенсивной магнитной коагуляции могут быть наличие в суспензии крупных (слипшихся) частиц (размером более 30—50 мкм), их остаточная намагниченность, высокая концентрация порошка в суспензии и др. Крупные частицы в суспензии, намагничиваясь, притягивают к себе мелкие частицы. В результате происходит быстрое увеличение длины цепочек. Чтобы ограничить слипание частиц, в суспензию вводят поверхностно-активное вещество (ПАВ). При этом частицы порошка покрываются одноименными электростатическими зарядами, создающими силу, отталкивающую частицы одну от другой. При добавлении ПАВ в результате магнитной коагуляции образуются в основном короткие цепочки. Образование коротких цепочек ускоряет процесс осаждения порошка над дефектами и образование индикаторного рисунка.

Скорость выявления дефекта зависит также от ряда других факторов:

— чем больше вязкость дисперсионной среды, тем меньше скорость осаждения частиц;

— при увеличении концентрации порошка накопление его над трещиной происходит быстрее, однако вместе с этим увеличивается фон из порошка на детали;

— если перемещать суспензию относительно поверхности детали, то накопление порошка происходит тем быстрее, чем больше скорость движения суспензии, так как больше частиц попадает в поле рассеяния дефекта в единицу времени; накопление порошка над трещиной происходит быстрее, если направление движения суспензии перпендикулярно к трещине.

Однако с увеличением скорости движения суспензии относительно контролируемой поверхности увеличивается смывающее действие потока жидкости. Поэтому давление струи жидкости при нанесении суспензии из фляги или из пипетки не должно быть слишком большим.

§ 4.11. Магнитные порошки, пасты и суспензии

Для контроля деталей со светлой поверхностью используют порошок окиси-закиси железа Fe_3O_4 черного или темно-коричневого цвета (ТУ 6-14-1009—74). Размер основной массы частиц порошка не превышает 30 мкм. Количество частиц размером более 30 мкм не превышает 5%. Магнитно-весовая проба должна быть не менее 7 г. Магнитно-весовая проба — это количество порошка, удерживаемое специальным электромагнитом (см. ТУ 6-14-1009—74); она характеризует магнитные свойства порошка.

При контроле деталей с темной поверхностью применяют красно-бурую гамма-окись железа γ-Fe_2O_3. Магнитно-весовая проба ее составляет не менее 8 г. Размер основной массы частиц лежит в пределах 0,5—10 мкм. Гамма-окись железа входит в состав пасты МП-70 (ТУ 6-14-38—71). В качестве заполнителя пасты применен технический вазелин. Паста предназначена для приготовления керосиновой суспензии.

Для приготовления суспензии в условиях эксплуатации в качестве дисперсионной среды применяют керосин Т1 или ТС (ГОСТ 10227—62), керосин осветительный (ГОСТ 4753—59), трансформаторное масло (ГОСТ 10121—62), масло МК-8 (ГОСТ 6457—53). Количество порошка на 1 л жидкости берут в зависимости от способа и целей контроля (табл. 10).

Таблица 10

Оптимальные концентрации черного магнитного порошка (ТУ 6-14-1009—74) в суспензии

Способ контроля	Контролируемая деталь, участок детали или цель контроля	Концентрация порошка, г/л	Дисперсионная среда
Контроль на остаточной намагниченности	Мелкая резьба (М5—М12)	5—7	Керосин
	Места перехода цилиндрической части болта к головке	10—15	Керосин
	Траверсы, амортизационные стойки, цилиндры, детали двигателя	20—25	Керосин 50% и масло 50%
	При расшифровке осаждений порошка по мнимому дефекту	3—10	Керосин или керосин 30% и масло 70%
Контроль в приложенном поле	Лопатки компрессора	3—6	Масло или керосин 50% и масло 50%
	Хромированные детали с толщиной хрома до 0,1 мм	10—30	Масло

С целью ограничения коагуляции в суспензию с черным порошком добавляют небольшое количество поверхностно-активного вещества (ПАВ). В результате предотвращается слипание частиц, значительно увеличивается устойчивость суспензии и повышается надежность выявления дефектов. Для каждого типа магнитного порошка подбирается соответствующее ПАВ. Например, суспензия с порошком, изготавливаемым по ТУ 6-14-1009—74, хорошо стабилизируется добавлением присадки «Акор-1» (ГОСТ 15171—70); суспензия с порошком γ-Fe_2O_3 — смесью ундециленовой кислоты и медной соли этой кислоты. В пасту МП-70 эти вещества добавляются при ее изготовлении.

Для составления суспензии с черным порошком (ТУ 6-14-1009—74) в расчетное количество порошка (табл. 10) добавляют 0,5—1% (от массы порошка) присадки «Акор-1». Затем в смесь вливают при помешивании немного масла МК-8 или керосина до образования пастообразной массы. Полученную массу тщательно размешивают. В емкость с массой, размешивая, наливают керосин, масло или их смесь в зависимости от типа требуемой суспензии.

В такой суспензии содержится 5—10% крупных и слипшихся частиц. Для удаления их суспензию размешивают и сразу же сливают в чистую емкость. Оставшийся на дне осадок из крупных частиц непригоден для контроля. Удалить крупные частицы можно фильтрацией суспензии через сетку с размером ячеек не более 30 мкм.

Для приготовления 1 л суспензии из пасты МП-70 сначала берут 20—30 г пасты и тщательно размешивают в 40—50 мл керосина. Эту смесь вливают в емкость с 1 л керосина. Подогревание пасты до температуры 40—50° С ускоряет ее растворение в керосине. Крупные частицы удаляют отстаиванием или фильтрацией суспензии. При осмотре деталей после нанесения суспензии, приготовленной с использованием пасты МП-70, получается больший цветовой контраст, если освещать деталь лампами накаливания. Если ее освещать люминесцентными лампами (лампами дневного света), то над трещинами порошок кажется серым.

§ 4.12. Контрольные образцы, способы изготовления дефектограмм

Наиболее общей оценкой качества суспензии является четкость выявления дефектов на контрольных образцах. Контрольный образец представляет собой деталь с известными мелкими шлифовочными трещинами, которые выявлены качественной суспензией и зафиксированы на специальной пленке — дефектограмме.

Для проверки суспензии ее наносят на намагниченный контрольный образец, затем сравнивают осаждение порошка на этом образце с рисунком трещин на дефектограмме. При совпадении рисунков суспензия считается качественной и допускается к применению.

Дефектограмма снимается с образца с помощью липкой ленты. Для этого на чистую поверхность намагниченного образца наносят тонкий слой вазелина, а затем из краскораспылителя — тонкий слой нитрокраски. На образец наносят магнитную суспензию, выявляют на нем трещины. Остатки суспензии удаляют погружением образца в бензин Б-70. После высыхания на поверхность образца из краскораспылителя наносят бесцветный маловязкий лак (аэролак первого покрытия, лак типа «Цапон» и др.) для закрепления порошка над трещинами. Накладывают на образец липкую прозрачную целлофановую или полиэтиленовую ленту и осторожно прижимают ее к поверхности образца. Затем ленту снимают вместе с ранее нанесенным слоем белой краски, слоем лака и находящимся между ними осевшим над трещинами порошком. Если ленту нельзя прижать равномерно к поверхности детали ввиду ее сложной формы, то лак наносят в несколько слоев до образования прочной пленки. После высыхания лака пленка с зафиксированными на ней трещинами легко снимается с образца.

§ 4.13. Расшифровка результатов контроля. Мнимые дефекты

Расшифровка результатов — наиболее ответственный этап МП контроля. Задачей ее является определение по характеру осаждения порошка истинных и мнимых дефектов. При

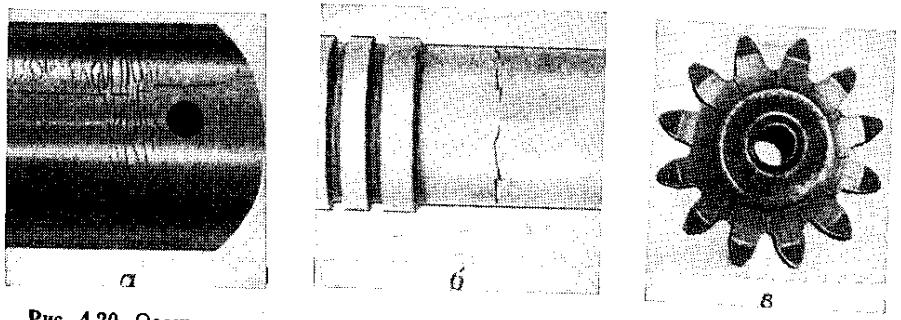


Рис. 4.20. Осаждение порошка над трещинами, выявленными при МП контроле: *а* — шлифовочными; *б* — усталостными; *в* — термическими

расшифровке анализируют картины осаждения порошка на поверхности детали, используя в ряде случаев оптические приборы. Рассмотрим наиболее характерные признаки различных дефектов.

Шлифовочные трещины выявляются в виде отдельных четких линий или сетки (рис. 4.20, *а*); усталостные трещины — в виде резко очерченных, четких линий в местах концентрации напряжений (рис. 4.20, *б*); термические трещины (рис. 4.20, *в*) выявляются так же четко, как шлифовочные; они расположены на поверхностях трения.

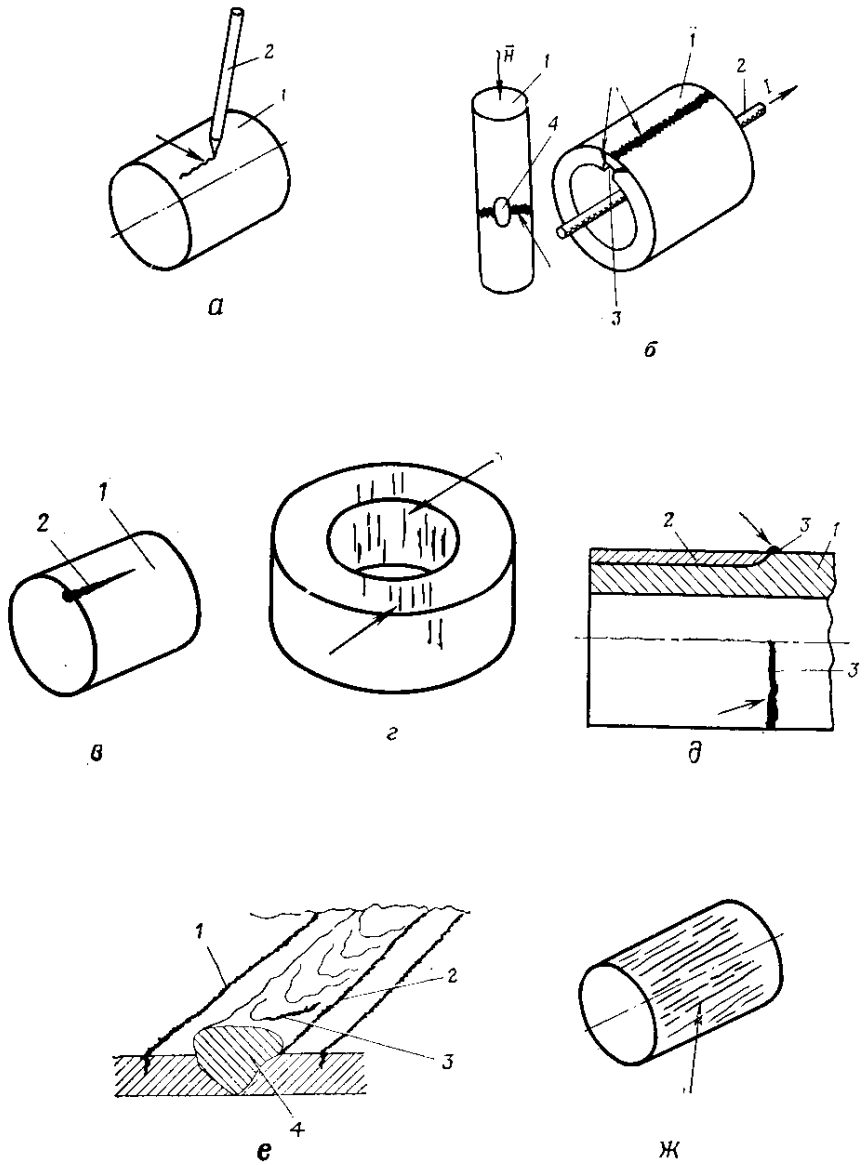


Рис. 4.21. Мнимые дефекты — осаждение

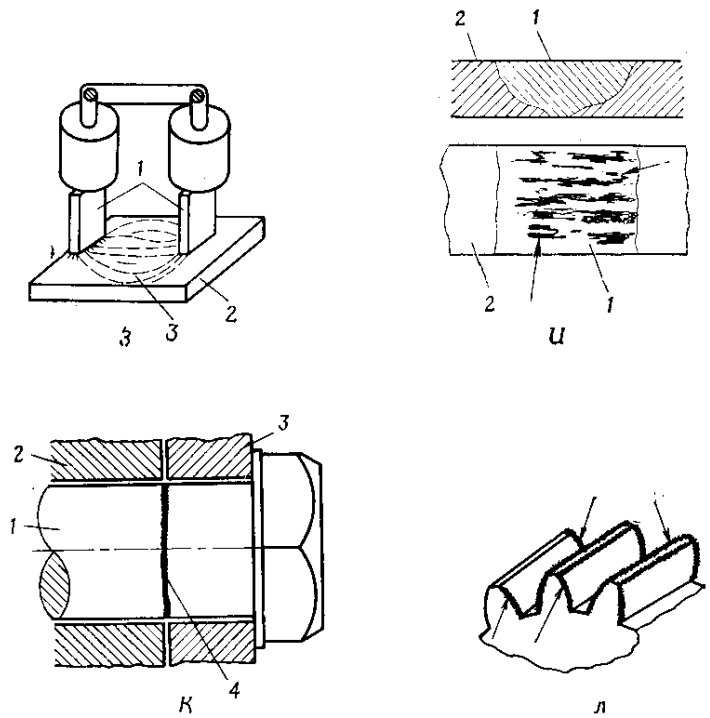
а — по месту касания детали *1* ферромагнитным предметом *2*; *б* — в местах уменьшенного сечения детали *1* из-за наличия отверстия *4* под болт и шпоночной канавки *3* (*2* — кабель с током *I*; $\bar{H}$ — напряженность намагничивающего поля); *в* — в месте наклепа (*1* — деталь; *2* — полоска порошка); *г* — в местах карбидной полосчатности и ликвации; *д* — по границе раздела участков с резко отличными структурами (*1* — основной материал; *2* — наплавленное кольцо; *3* — осажденный порошок); *е* — по границам зон (полоска *1*) термического влияния сварки, по наплывам *3* и границам *2* сварных швов *4*; *ж* — по волокнам металла; *3* — по магнитным силовым линиям поля (*1* — полюсные наконечники; *2* — проверяемая деталь; *3* — осаждение порошка в виде цепочек); *и* — по местам магнитной неоднородности материала сварного шва со снятым валиком (*1* — сварной шов; *2* — основной материал); *к* — в местах внутренних напряжений (*1* — болт; *2* и *3* — стягиваемые болтом детали; *4* — полоска порошка); *л* — по острым кромкам детали

Волосовины выявляются в виде прямых линий различной длины, расположенных вдоль волокон. Осаждение порошка над закатами имеет вид серии извилистых линий.

Флокены выявляются в виде отдельных прямолинейных или искривленных черточек длиной до 30 мм, расположенных группами и имеющих случайное направление.

Неметаллические (шлаковые) включения выявляются в виде цепочек или точечных скоплений порошка.

Рассмотрим признаки **мнимых дефектов.** Образование полей рассеяния на стальных деталях при отсутствии дефекта может происходить в случаях наличия структурной неоднородности, ярко выраженной текстуры, концентраций остаточных напряжений, резкого сужения сечения детали, мест грубой механической обработки проверяемой поверхности и т. д. Наиболее часто встречающиеся осаждения магнитного порошка при отсутствии несплошности и способы их расшифровки следующие.



Осаждение порошка (рис. 4.21, *а*) по месту касания намагниченной детали *1* каким-либо ферромагнитным предметом *2*. Для выяснения причины осаждения контролируемую деталь необходимо повторно намагнитить. После повторного намагничивания осаждения порошка над местом, к которому ранее прикасался ферромагнитный предмет, не будет.

Осаждение порошка в местах резкого изменения сечения детали в виде размытых (нечетких) полос (рис. 4.21, *б*). Для расшифровки такого индикаторного рисунка необходимо дополнить сечение детали, например вставить болт, шпонку и т. д. При повторном намагничивании и нанесении суспензии порошок оседать не будет, если в этом месте нет нарушения сплошности металла.

Осаждение порошка по рискам получается неинтенсивным. Если риска имеет острые края или если ее глубина несколько больше ширины, то плотность осаждения порошка над ней больше, но четкого валика не получается. Кроме того, при боковом освещении риска даже без нанесения порошка может выглядеть как нитевидное его осаждение (из-за неосвещенности боковой теневой поверхности и дна риски). Чтобы отличить риску от трещины, необходимо тщательно осмотреть поверхность детали через лупу 4—10-кратного увеличения, несколько изменяя угол падения световых лучей и угол осмотра. При этом риска на чистой поверхности хорошо видна. При освещении поверхности лучами, падающими вдоль риски, можно различить ее дно и края.

Если контролируемая поверхность недостаточно чиста, например покрыта коррозией, то следует ее зачистить мелким наждачным полотном. При зачистке происходит не только удаление продуктов коррозии, но и скругление краев риски. Поэтому при повторном нанесении суспензии после зачистки риски порошок над ней обычно не оседает.

При контроле в приложенном магнитном поле порошок по рискам оседает почти всегда.

В случаях сомнений для расшифровки может быть применен следующий способ. Наблюдая через лупу или бинокулярный микроскоп место расположения риски, наносят каплями из пипетки суспензию, отстоявшуюся в течение 3—5 мин после размешивания. Если на поверхности изделия имеется риска, а на дне риски трещины нет, то накопление порошка будет происходить сначала в виде отдельных точечных скоплений, которые затем увеличиваются до образования цепочек. При дальнейшем нанесении суспензии цепочки удлиняются, их количество увеличивается до полного заполнения риски. Если по дну риски проходит трещина, то накопление порошка происходит сразу по всей длине трещины; при этом четко обрисовываются ее очертания. При дальнейшем нанесении суспензии увеличивается количество порошка над трещиной до полного заполнения риски. Таким образом, разница в процессе осаждения порошка по риске без трещины и по риске с трещиной может быть обнаружена только в начальной стадии

накопления порошка. После окончания процесса осаждения сделать заключение об отсутствии или о наличии трещины по дну риски часто бывает невозможно.

Осаждение порошка в местах поверхностного наклепа на детали *1* (рис. 4.21, *в*) происходит из-за значительного уменьшения на этих участках магнитной проницаемости материала и образования слабых полей рассеяния. Порошок осаждается в виде неплотной полоски *2* с размытыми краями. После удаления осевшего порошка в местах наклепа иногда видна светлая полоска.

Осаждение порошка в местах карбидной полосчатности и ликвации (рис. 4.21, *г*) аналогично осаждению над трещиной. Различить их часто бывает очень трудно, поэтому в этих случаях целесообразно дополнительно деталь проверить другим методом, например цветным.

Осаждение порошка по границе раздела участков с резко отличными структурами (рис. 4.21, *д*) отличается от других типов мнимых дефектов тем, что имеет вид непрерывной линии по всей границе раздела участков. При одном и том же способе намагничивания осаждение порошка происходит на всех таких же деталях или таких же участках детали в одних и тех же местах. Например, по границе основного материала *1* и наплавленного кольца *2* оси поворотного узла происходит осаждение порошка *3* по всей его окружности. Знание конструктивных особенностей деталей, условий их нагружения и технологии изготовления облегчает распознавание мнимого дефекта такого типа.

Осаждение порошка в зонах термического влияния (рис. 4.21, *е*) повторяет форму границы сварного шва *4*. Это осаждение имеет вид размытых неплотных полосок *1*. В потоке суспензии осевший порошок легко смывается, но при натекании суспензии с других участков контролируемой детали вновь накапливается там же. Порошок может осаждаться при контроле как в приложенном поле, так и на остаточной намагниченности. Осаждение порошка по наплывам *3* и границам *2* сварных швов (рис. 4.21, *е*) происходит вследствие резкого перехода одной части поверхности шва к другой. Для установления причины осаждения порошка целесообразно этот наплыв сошлифовать (если это допускается технологией выполнения работ), сделав его плавным, вновь намагнитить и нанести суспензию. Если при повторном нанесении суспензии порошок не оседает, то дефекта нет.

Осаждение порошка по волокнам металла (рис. 4.21, *ж*) может происходить при контроле в приложенном поле, а иногда и на остаточной намагниченности; оно отличается характерной направленностью по волокнам. Для уменьшения его интенсивности снижают оптимальный намагничивающий ток на 15—20%. Если это не устраняет осаждения порошка по волокнам, то применяют другие методы дефектоскопии, например цветной.

Осаждение порошка *3* в виде цепочек, ориентированных по магнитным силовым линиям поля

(рис. 4.21, *з*), возникает обычно при контроле в приложенном поле с помощью электромагнита. Такое осаждение порошка может свидетельствовать о завышенной концентрации магнитной суспензии, высокой напряженности поля или о низкой вязкости дисперсионной среды суспензии.

Осаждение порошка по поверхности сварного шва *1* (рис. 4.21, *и*), валик которого сошлифован, в местах магнитной неоднородности, образующейся при сварке деталей из высокопрочных нержавеющих сталей, имеет вид неплотных пятен, чешуек различной формы и размеров с нечеткими границами; наблюдается при контроле в приложенном поле. При контроле на остаточной намагниченности накопление порошка происходит лишь при натекании суспензии с соседних участков.

Осаждение порошка в местах концентрации остаточных напряжений имеет вид широкой неплотной (1—2 мм) полоски *4* (рис. 4.21, *к*). Порошок слабо удерживается на поверхности детали. Часто наблюдается на болтах с большой наработкой.

Осаждение порошка по острым кромкам, углам, ребрам выступающих частей детали, на которых образуются резко напряженные магнитные полосы (рис. 4.21, *л*), имеет нитевидную или игольчатую структуру. Чаще всего происходит при продольном намагничивании деталей. Нити направлены по магнитным силовым линиям полюсно намагниченной детали. Интенсивность такого осаждения всегда выше при намагничивании постоянным полем, меньше при намагничивании переменным и практически отсутствует при использовании импульсных полей.

При осаждении порошка по местам грубой обработки поверхности (ниже ▽6 или ▽7) он заполняет все углубления поверхности; количество порошка над ними растет с увеличением напряженности поля. Легко распознается при осмотре с помощью лупы.

§ 4.14. Магнитные дефектоскопы

В эксплуатации применяют переносные и передвижные магнитные дефектоскопы, которые могут быть универсальными или специализированными и использоваться для контроля как снятых, так и установленных в конструкции ЛА деталей.

Универсальный переносный магнитный дефектоскоп ПМД-70 (рис. 4.22 и 4.23) позволяет контролировать различные по форме детали, намагничивать и размагничивать их с применением электромагнита, катушки, кабелей различного сечения, осуществлять циркулярное намагничивание и размагничивание участков сварных швов и деталей путем пропускания по ним тока. Позволяет намагничивать выпрямленным, переменным и импульсным током. Обеспечивает практически полное размагничивание в течение

30—50 с контролируемых деталей с применением тех же приспособлений, которыми проводилось намагничивание.

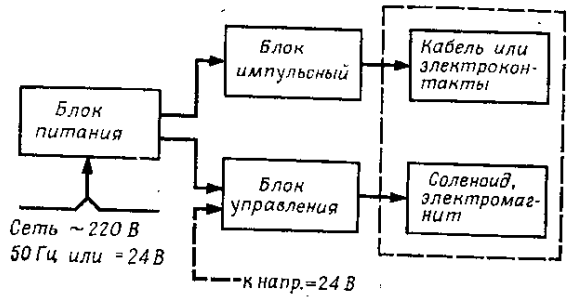


Рис. 4.22. Структурная схема дефектоскопа ПМД-70

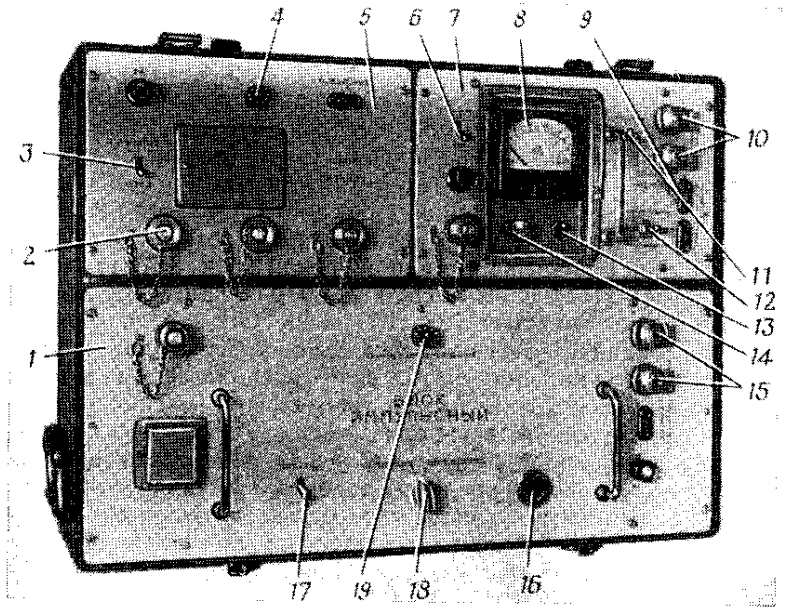


Рис. 4.23. Переносный магнитный дефектоскоп ПМД-70:

1 — блок импульсный; *2* — разъем ПИТАНИЕ; *3* — выключатель ПИТАНИЕ; *4* — лампа сигнализации; *5* — блок питания; *6* — выключатель питания; *7* — блок управления; *8* — вольтамперметр; *9* — розетка ЭЛЕКТРОМАГНИТ — СОЛЕНОИД; *10* — цанговые зажимы; *11* — выключатель КОНТАКТОР; *12* — переключатель НАМАГНИЧИВАНИЕ — РАЗМАГНИЧИВАНИЕ; *13* — переключатель вольтамперметра ИЗМЕРЕНИЕ; *14* — регулятор тока (ТОК); *15* — цанговые зажимы; *16* — кнопка ПУСК; *17* — выключатель ПИТАНИЕ; *18* — переключатель НАМАГНИЧИВАНИЕ — РАЗМАГНИЧИВАНИЕ; *19* — лампа сигнализации

Питание дефектоскопа — от источника постоянного тока напряжением 24 В или от сети переменного тока напряжением 220 В 50 Гц. Максимальная потребляемая мощность не превышает

250 Вт. Величина импульса тока в режиме импульсного намагничивания с применением кабеля длиной 4 м сечением 3 мм² составляет не менее 500 А, а сечением 10 мм² — не менее 1000 А.

Напряженность магнитного поля электромагнита при расстоянии между полюсными наконечниками 100 мм может плавно регулироваться от нуля до $20 \cdot 10^3$ А/м (250 Э). Напряженность магнитного поля в центре катушки при включении ее непосредственно в сеть 220 В 50 Гц при последовательном соединении обмоток составляет не менее $20 \cdot 10^3$ А/м, при параллельном соединении обмоток не менее $40 \cdot 10^3$ А/м.

Дефектоскоп состоит из блока питания, импульсного блока, блока управления, намагничивающих устройств и приспособлений для нанесения суспензии и осмотра деталей (см. рис. 4.22).

Импульсный блок формирует в режиме намагничивания мощный импульс тока, а в режиме размагничивания — серию разнополярных убывающих по амплитуде импульсов тока, пропускаемых по кабелю или непосредственно по детали, когда контроль ведется с помощью электроконтактов.

Блок управления позволяет вручную регулировать величину тока в обмотках электромагнита или катушки в режиме намагничивания. В режиме размагничивания он обеспечивает плавное ручное снижение тока в электромагните (катушке) от максимума до нуля с одновременным автоматическим изменением его направления. Блок управления (масса 5 кг) может извлекаться из чемодана и использоваться автономно. В этом случае он работает от сети постоянного тока напряжением 24 В. В случае намагничивания гибким кабелем, подключаемым к цанговым зажимам, при нажатии на переключатель КОНТАКТОР кабель через контактор подсоединяется непосредственно к источнику питания. Этот способ можно применять, если располагаемая мощность источника не менее 20 кВт и не требуется размагничивания детали после проведенного контроля.

Шарнирный электромагнит для контроля отдельных участков деталей в приложенном поле имеет универсальные полюсные наконечники с «утапливающимися» стержнями, что позволяет создавать хороший контакт с неровной поверхностью детали.

Дефектоскоп устойчиво работает при температуре от —35 до +40° С, относительной влажности до 95% (при 30° С).

Габариты дефектоскопа — 620×500×260 мм; масса — 45 кг; масса принадлежностей — 18 кг.

Переносный магнитный дефектоскоп 77ПМД-3М (рис. 4.24). Питание от сети постоянного тока напряжением 24—27 В. Потребляемый ток — не более 5 А. Потребляемая мощность — не более 150 Вт. Для питания катушки может использоваться также сеть переменного тока напряжением 220 В 50 Гц. Потребляемый ток: при параллельном соединении секций катушки — 8,5 А, при последовательном соединении — 1,2 А. При таком питании и параллельном соединении секций напряженность поля в центре катушки составляет $4 \cdot 10^4$ А/м.

Электромагнит имеет две катушки, которые могут соединяться последовательно или параллельно с помощью переключателя НАМАГНИЧИВАНИЕ — РАЗМАГНИЧИВАНИЕ. Этот переключатель играет роль двухступенчатого регулятора напряженности поля в электромагните.

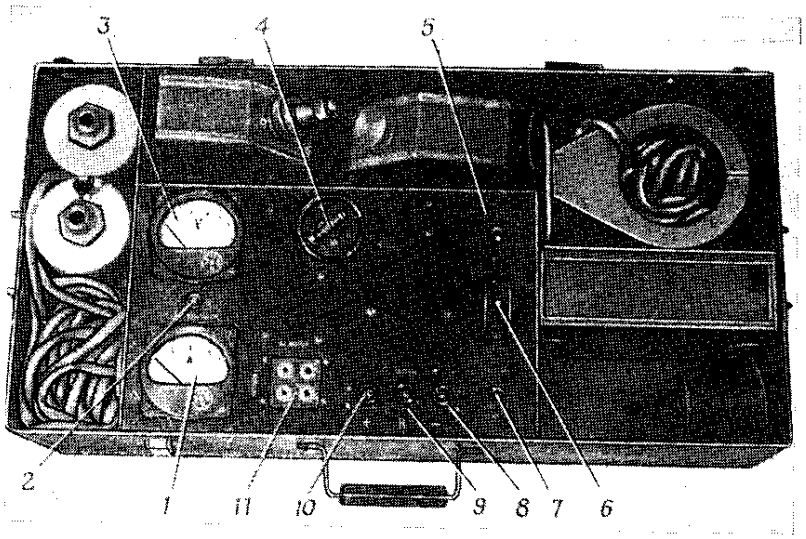


Рис. 4.24. Переносный магнитный дефектоскоп 77ПМД-3М:
1 — амперметр; *2* — кнопка; *3* — вольтметр; *4* — штурвальчик; *5* — переключатель КАТУШКА, ЭЛЕКТРОМАГНИТ; *6* — переключатель КОНТАКТОР; *7* — переключатель НАМАГНИЧИВАНИЕ — РАЗМАГНИЧИВАНИЕ; *8*, *9* и *10* — клеммы «—», «К» и «+»; *11* — гнезда

Напряженность поля посредине между полюсами электромагнита при параллельном соединении катушек и расстоянии между ними 100 мм составляет $12{,}8 \cdot 10^3$ А/м.

Намагничивающий кабель используется только для намагничивания деталей. Длительность пропускания тока по кабелю составляет 0,5—1 с. Потребляемый ток — 700—800 А. Более длительное пропускание тока не приводит к увеличению намагниченности детали, а лишь вызывает дополнительный нагрев кабеля. Размагничивание осуществляется периодическим изменением (с помощью переключателя) направления тока в обмотках катушки или электромагнита с одновременным их удалением от размагничиваемой детали.

Габариты дефектоскопа — 640×330×210 мм; масса — 30 кг.

Передвижной магнитный дефектоскоп У-601-64С позволяет проверять крупногабаритные детали и узлы как снятые, так и находящиеся в конструкции ЛА. Состоит из силового блока и рабочего стола, смонтированных на тележках. Кроме них в комплект де-

фектоскопа входят электромагнит, катушка, кабели, электроконтакты.

Питание от сети переменного тока напряжением 380/220 В 50 Гц. Наибольшая потребляемая мощность — 40 кВт. Наибольший переменный намагничивающий ток — 3200 А, выпрямленный — 3500 А.

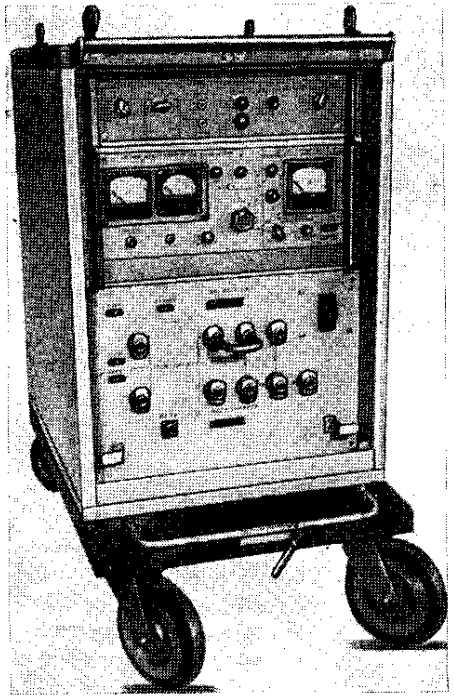


Рис. 4.25. Передвижной магнитный дефектоскоп МД-50П

Наибольшая напряженность поля в соленоиде — $40 \cdot 10^3$ А/м.

Для циркулярного намагничивания снятых деталей служит устройство, которое может устанавливаться в вертикальное или в горизонтальное положение. Наибольшее расстояние между подвижной и неподвижной контактными пластинами зажимного устройства — 68 см.

Дефектоскоп снабжен гидравлической системой, которая обеспечивает подачу суспензии на контролируемые детали, а также непрерывное ее размешивание во избежание оседания магнитного порошка на дно бачка во время работы. Для контроля мелких деталей способом окунания предусмотрена специальная ванна, встроенная в поддон рабочего стола. В рабочем столе установлен компрессор сжатого воздуха на 3 кгс/см² (0,3 МПа), который можно использовать для удаления остатков суспензии с контролируемой поверхности. Детали размагничивают автоматически теми же устройствами, которыми их намагничивали.

Управление дефектоскопом может осуществляться с пульта управления силового блока или дистанционно с переносного пульта управления.

Габариты: силового блока — 1120×775×1130 мм; рабочего стола — 1070×605×1920 мм. Масса: силового блока — 500 кг; рабочего стола — 300 кг.

Передвижной магнитный дефектоскоп МД-50П (рис. 4.25) смонтирован на тележке. Он позволяет контролировать крупногабаритные детали и узлы непосредственно в конструкции ЛА

(стойки шасси, балки крыла, узлы подвески двигателя и др.).

Намагничивание пропусканием тока по детали или по кабелю может проводиться переменным, выпрямленными однополупериодным или двухполупериодным и импульсным токами. Предусмотрено регулирование и измерение амплитудного значения токов от нуля до максимального значения. Это обеспечивает возможность выбора и установления правильного режима намагничивания. Имеется возможность одновременного намагничивания переменным (выпрямленным) и импульсным токами, что расширяет номенклатуру проверяемых деталей.

При контроле в приложенном поле импульсного тока частота следования импульсов может устанавливаться 2, 4, 6 и 8 Гц, что позволяет выбирать ее оптимальное значение в зависимости от размеров детали и способов нанесения магнитного порошка.

Для более полного размагничивания различных по форме и магнитным свойствам деталей частоту следования импульсов также можно регулировать.

Благодаря применению в качестве разрядных элементов накопительных электрических конденсаторов и тиристоров дефектоскоп позволяет намагничивать с помощью кабелей сечением 50 мм² и длиной 6 м детали импульсным током силой до 5000 А при относительно небольшой потребляемой мощности, что позволяет подключать его к розетке осветительной сети.

Питание дефектоскопа — от сети переменного тока напряжением 220 В 50 Гц. Максимальная потребляемая мощность — 5 кВт. Наибольшее значение переменного тока — 1000 А, выпрямленного двухполупериодного 400 А.

Максимальная напряженность в центре межполюсного промежутка электромагнита при расстоянии между полюсами 70 мм — не менее $12{,}8 \cdot 10^3$ А/м. Максимальная напряженность поля в центре на оси соленоида составляет $40 \cdot 10^3$ А/м.

Детали можно размагничивать с помощью электромагнита, катушки, кабелей или электроконтактов автоматически или снижением тока вручную. Длительность цикла размагничивания — 20—50 с.

Предусмотрены измерители импульсного и выпрямленного токов. Дефектоскоп сохраняет работоспособность при температуре окружающего воздуха от минус 30° до +50° С и относительной влажности до 95% при температуре +25° С.

Габариты дефектоскопа — 1300×600×800 мм; масса — 290 кг.

Специализированный магнитный дефектоскоп МДЛ-70 предназначен для контроля лопаток компрессора в приложенном поле электромагнита. Питание дефектоскопа — от сети постоянного тока напряжением 24—27 В. Потребляемая мощность не превышает 150 Вт. Напряженность поля на полюсах электромагнита можно регулировать от нуля до 24 000 А/м.

Проверенные лопатки размагничивают, изменяя направление тока и одновременно уменьшая его величину с помощью ступенчатого переключателя. Габариты дефектоскопа — 250×120×165 мм; масса — не более 3 кг; масса электромагнита — 0,75 кг.

§ 4.15. Последовательность проведения контроля с применением дефектоскопов 77ПМД-3М и ПМД-70

Последовательность выполнения работ по контролю с применением дефектоскопа 77ПМД-3М (рис. 4.26) приведена в табл. 11. Перечень основных работ, выполняемых на дефектоскопе, приведен в графе 1. В графах 2—8 цифры указывают последовательность выполнения работ при контроле способом остаточной намагниченности (ОН), в приложенном поле (ПП) и при размагничивании (Р). В графах 2 и 3 указана последовательность выполнения работ с использованием катушки при питании ее через дефектоскоп, а в графах 4 и 5 — непосредственно от сети 220 В 50 Гц. Электромагнит и кабель подключают к источнику питания только через дефектоскоп (графы 6 и 8). С применением кабеля контроль проводится на остаточной намагниченности (графа 8). Размагничивание кабелем не предусмотрено.

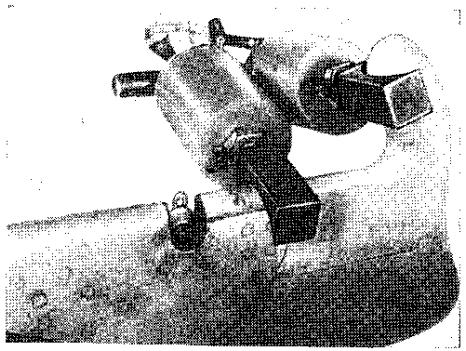


Рис. 4.26. Контроль балансира руля высоты самолета с помощью электромагнита дефектоскопа 77ПМД-3М

Пример. Нужно проверить балансир руля высоты самолета в приложенном поле электромагнита. Определяем последовательность работы. Используя графы 1 и 6 и рис. 4.24, находим последовательность выполнения работ:

1. Подключить питание = 27 В (сеть напряжением 27 В постоянного тока) к дефектоскопу.
2. Проверить напряжение по вольтметру *3*, нажав на кнопку *2* вольтметра.
3. Подключить к гнездам *11* дефектоскопа электромагнит.
4. Переключатель *7* (НАМАГНИЧИВАНИЕ — РАЗМАГНИЧИВАНИЕ) поставить в положение НАМАГНИЧИВАНИЕ.
5. Совместить ручку на штурвальчике *4* с риской на панели дефектоскопа.
6. Установить электромагнит на контролируемый участок балансира (см. рис. 4.26).

Таблица 11

Последовательность выполнения работ по контролю с применением дефектоскопа 77ПМД-3М

Работы по контролю		Устройства для намагничивания и размагничивания						
		Катушка				Электромагнит		Кабель
		Питание						
		от дефектоскопа		от сети 220 В 50 Гц		от дефектоскопа		
		ОН	Р	ОН	Р	ПП	Р	ОН
1		2	3	4	5	6	7	8
Подключить питание = 27 В к дефектоскопу		1	1			1	1	1*
Проверить напряжение питания, нажав на кнопку *2* (рис. 4.24) вольтметра *3*		2	2			2	2	2
Подключить к гнездам *11* дефектоскопа:	электромагнит					3	3	
	катушку	3	3					
Переключатель *7* (НАМАГНИЧИВАНИЕ — РАЗМАГНИЧИВАНИЕ) поставить в положение:	НАМАГНИЧИВАНИЕ					4		
	РАЗМАГНИЧИВАНИЕ						4	
Переключатель на катушке поставить в положение:	ПОСТОЯННЫЙ	4	4					
	ПЕРЕМЕННЫЙ			1	1			
Поместить деталь в катушку		5	5	2	2			
Вставить вилку катушки в розетку 220 В 50 Гц на 0,5—1 с				3				
Вставить вилку катушки в розетку 220 В 50 Гц					3			

Продолжение

Работы по контролю		Устройства для намагничивания и размагничивания						
		Катушка				Электромагнит		Кабель
		Питание						
		от дефектоскопа		от сети 220 В 50 Гц		от дефектоскопа		
		ОН	Р	ОН	Р	ПП	Р	ОН
1		2	3	4	5	6	7	8
Совместить риску на штурвальчике *4* с риской на панели дефектоскопа		6	6			5	5	
Установить электромагнит на деталь						6	6	
Переключатель *5* (КАТУШКА, ЭЛЕКТРОМАГНИТ):	включить	7	7			7	7	
	выключить	9	10			10	10	
Проверить ток по амперметру *1*		8	8			8	8	
Намотать кабель на деталь								3
Вынуть деталь из катушки		10		4				
Подключить кабель к клеммам *8* («—») и *9* («К»)								4
Вращать штурвальчик по ходу часовой стрелки со скоростью 0,5—1 об/с			9				9	
Удалить деталь из катушки на 0,5—0,7 м в течение 10—15 с			9		4			
Удалить электромагнит от детали на 0,5—0,7 м в течение 10—15 с							9	
Переключатель *6* (КОНТАКТОР) включить на 0,5—1 с								5

Продолжение

Работы по контролю	Устройства для намагничивания и размагничивания						
	Катушка				Электромагнит		Кабель
	Питание						
	от дефектоскопа		от сети 220 В 50 Гц		от дефектоскопа		
	ОН	Р	ОН	Р	ПП	Р	ОН
1	2	3	4	5	6	7	8
Снять кабель с детали							6
Нанести магнитную суспензию и осмотреть деталь	11		5		9		7
Вынуть вилку катушки из розетки 220 В 50 Гц				5			

* Мощность источника питания должна быть не менее 20 кВт.

7. Включить переключатель *5* (КАТУШКА, ЭЛЕКТРОМАГНИТ).
8. Проверить ток по амперметру *1*.
9. Нанести магнитную суспензию и провести осмотр.
10. Выключить переключатель *5* (КАТУШКА, ЭЛЕКТРОМАГНИТ).

Последовательность работ при размагничивании найдем, используя графы 1, 8 табл. 11 и рис. 4.24.

1. Подключить питание =27 В к дефектоскопу.
2. Проверить напряжение питания по вольтметру *3*, нажав на кнопку *2* вольтметра.
3. Подключить к гнездам *11* дефектоскопа электромагнит.
4. Переключатель *7* (НАМАГНИЧИВАНИЕ — РАЗМАГНИЧИВАНИЕ) поставить в положение РАЗМАГНИЧИВАНИЕ.
5. Совместить риску на штурвальчике *4* с риской на панели дефектоскопа.
6. Установить электромагнит на балансир (см. рис. 4.26).
7. Включить переключатель *5* (КАТУШКА, ЭЛЕКТРОМАГНИТ).
8. Проверить ток по амперметру *1*.
9. Вращая штурвальчик *4* по ходу часовой стрелки со скоростью 0,5—1 об/с, одновременно удалить электромагнит от детали на 0,5—0,7 м в течение 10—15 с.

Таблица 12

Последовательность выполнения работ по контролю с применением дефектоскопа ПМД-70

Работы по контролю	Устройства для намагничивания и размагничивания											
	Катушка				Электромагнит		Кабель				Электроконтакты	
	Питание											
	от БУ		от сети 220 В		от БУ		от БИ		от БУ		от БИ	
	ОН	Р	ОН	Р	ПП	Р	ОН	Р	ОН	Р	ОН	Р
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Соединить кабелем блок питания (БП) *5* (рис. 4.23) и блок управления (БУ) *7*	1	1			1	1						
Соединить кабелем БП (*5*) и блок импульсный (БИ) *1*							1	1			1	1
Вставить вилку катушки в розетку 220 В 50 Гц			1	1								
Подключить питание=24 В к БУ (*7*)									1[1]			
Подключить питание=24 В или 220 В 50 Гц к БП (*5*)	2[2]	2[2]			2[2]	2[2]	2	2			2	2
Подключить к розетке *9* БУ (*7*): электромагнит					3	3						
Подключить к розетке *9* БУ (*7*): катушку	3	3										

Продолжение

Работы по контролю	Устройства для намагничивания и размагничивания											
	Катушка				Электромагнит		Кабель				Электроконтакты	
	Питание											
	от БУ		от сети 220 В		от БУ		от БИ		от БУ		от БИ	
	ОН	Р	ОН	Р	ПП	Р	ОН	Р	ОН	Р	ОН	Р
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Намотать кабель на деталь или продеть его через деталь							3	3	2			
Подключить кабель к цанговым зажимам *10* на БУ (*7*)									3			
Подключить кабель к цанговым зажимам *15* на БИ (*1*)							4	4				
Подключить электроконтакты к цанговым зажимам *15*											3	3
Поместить деталь в катушку	4	4	2	2								
Выключатель *3* (ПИТАНИЕ) на БП (*5*): включить	5[3]	5[3]			4[3]	4[3]	5	5			4	4
Выключатель *3* (ПИТАНИЕ) на БП (*5*): выключить	19[3]	19[3]			17[3]	17[3]	14	14			14	13

Продолжение

Работы по контролю		Устройства для намагничивания и размагничивания											
		Катушка				Электромагнит		Кабель				Электроконтакты	
		Питание											
		от БУ		от сети 220 В		от БУ		от БИ		от БУ		от БИ	
		ОН	Р	ОН	Р	ПП	Р	ОН	Р	ОН	Р	ОН	Р
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Проверить подключение питания по загоранию лампы *4* на БП (*5*)		6[3]	6[3]			5[3]	5[3]	6	6			5	5
Выключатель *17* (ПИТАНИЕ) на БИ (*1*):	включить							7	7			6	6
	выключить							11	12[4]			13	12
Установить электромагнит на деталь						8	8						
Переключатель на колодке электромагнита поставить в положение:	ВКЛЮЧЕНО					9	9						
	ВЫКЛЮЧЕНО					15	15						
Выключатель *6* питания на БУ (*7*) поставить в положение:	ВКЛЮЧЕНО	7	7			6	6			4			
	ВЫКЛЮЧЕНО	18	18			16	16			10			

Продолжение

Работы по контролю		Устройства для намагничивания и размагничивания											
		Катушка				Электромагнит		Кабель				Электроконтакты	
		Питание											
		от БУ		от сети 220 В		от БУ		от БИ		от БУ		от БИ	
		ОН	Р	ОН	Р	ПП	Р	ОН	Р	ОН	Р	ОН	Р
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Переключатель *12* (НАМАГНИЧИВАНИЕ — РАЗМАГНИЧИВАНИЕ) на БУ (*7*) поставить в положение:	НАМАГНИЧИВАНИЕ	8	8			7	7						
	РАЗМАГНИЧИВАНИЕ		13				13						
Переключатель *13* (ИЗМЕРЕНИЕ) поставить в положение:	ТОК	11	11			12	12						
	НАПРЯЖЕНИЕ	9	9			10	10			5			
Проверить напряжение питания по вольтамперметру *8* на БУ (*7*)		10	10			11	11			6			
Переключатель на панели катушки поставить в положение:	ПОСТОЯННЫЙ	12	12	3[5]	3[5]								
	ПЕРЕМЕННЫЙ												
Нажать кнопку на панели катушки на 0,5—1 с				4									

Продолжение

Работы по контролю		Устройства для намагничивания и размагничивания											
		Катушка				Электромагнит		Кабель				Электроконтакты	
		Питание											
		от БУ		от сети 220 В		от БУ		от БИ		от БУ		от БИ	
		ОН	Р	ОН	Р	ПП	Р	ОН	Р	ОН	Р	ОН	Р
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Нажать кнопку на панели катушки		13	14		4								
Установить расчетный ток регулятором *14* (ТОК) на БУ (*7*)		14				13							
Регулятор *14* (ТОК) повернуть вправо до отказа, а затем в течение 10—15 с вывести его влево до отказа			15				14						
Переключатель *18* (НАМАГНИЧИВАНИЕ — РАЗМАГНИЧИВАНИЕ) на БИ (*1*) поставить в положение:	НАМАГНИЧИВАНИЕ							8	8			7	
	РАЗМАГНИЧИВАНИЕ								10				7
Отпустить кнопку на панели катушки		15	16		6								
Выключатель *11* (КОНТАКТОР) включить на 0,5—1 с										7			

Продолжение

Работы по контролю	Устройства для намагничивания и размагничивания											
	Катушка				Электромагнит		Кабель				Электроконтакты	
	Питание											
	от БУ		от сети 220 В		от БУ		от БИ		от БУ		от БИ	
	ОН	Р	ОН	Р	ПП	Р	ОН	Р	ОН	Р	ОН	Р
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Проверить готовность БИ по сигнальной лампе							9	9			8	8
Нажать кнопку *16* (ПУСК) на панели дефектоскопа на 1—2 с							10	11				
Установить электроконтакты на деталь											9	9
Нажать кнопку *16* (ПУСК) на электроконтакте на 1—2 с											10	10
Вынуть деталь из катушки	16	17	5									
Удалить деталь из катушки на 0,5—0,7 м в течение 10—15 с				5								
Снять кабель с детали							12	13	8			

Продолжение

Работы по контролю	Устройства для намагничивания и размагничивания																	
	Катушка						Электромагнит			Кабель							Электроконтакты	
	Питание																	
	от БУ		от сети 220 В		от БУ			от БИ			от БУ				от БИ			
	ОН	Р	ОН	Р	ПП	Р		ОН	Р		ОН	Р			ОН	Р		
1	2	3	4	5	6	7		8	9		10	11			12	13		
Снять электроконтакты с детали															11	11[4]		
Вынуть вилку катушки из розетки 220 В 50 Гц			6	7														
Нанести магнитную суспензию и осмотреть деталь	17		7		14			13			9				12			

Примечание. Числа в степени обозначают:
1 — мощность источника питания должна быть не менее 20 кВт;
2 — сеть напряжением =24 В подключать непосредственно к БУ;
3 — работы не выполнять, если сеть =24 В подключена непосредственно к БУ;
4 — работы выполнять после окончания процесса размагничивания (через 40—50 с после нажатия на кнопку ПУСК);
5 — напряженность поля в катушке при положении переключателя: постоянный — не менее 500 Э, переменный — не менее 200 Э.

Сокращения:
ОН — контроль способом остаточной намагниченности; ПП — контроль способом приложенного магнитного поля;
Р — размагничивание.
Числа в графах 2—13 указывают последовательность выполнения работ по контролю, указанных в графе 1.

10. Выключить переключатель *5* (КАТУШКА, ЭЛЕКТРОМАГНИТ).

Последовательность проведения контроля с применением дефектоскопа ПМД-70 приведена в табл. 12. Последовательность контроля с применением катушки при питании ее от блока управ-

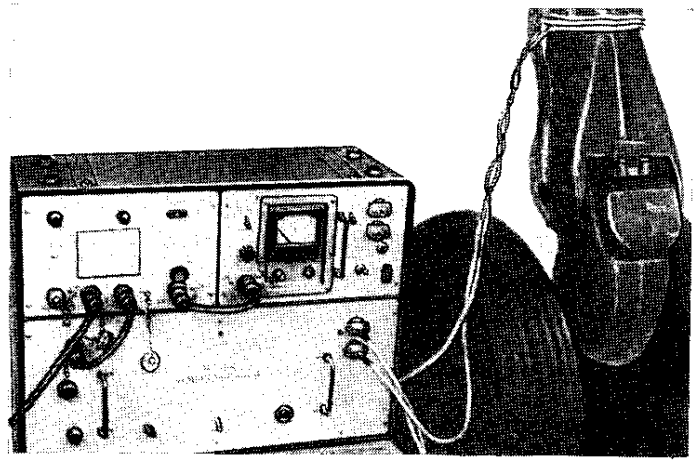


Рис. 4.27. Контроль стойки шасси самолета дефектоскопом ПМД-70

ления (БУ) обозначена цифрами в графах 2 и 3, а при питании непосредственно от сети 220 В — цифрами в графах 4 и 5. Питание электромагнита осуществляется только от блока управления (БУ). Контроль детали дефектоскопом проводится в приложенном поле (ПП, графа 6). Последовательность размагничивания электромагнитом указана в графе 7. Питание кабеля может осуществляться от импульсного блока (БИ, графы 8, 9) или блока управления (БУ, графа 10). Размагничивание кабелем, подсоединенным к блоку управления, не предусмотрено (графа 11). Электроконтакты могут подключаться только к блоку БИ. Последовательность выполнения работ по контролю с применением электроконтактов указана в графах 12 и 13.

Пример. Необходимо проверить поперечный сварочный шов на стойке шасси самолета (рис. 4.27) с применением кабеля, питаемого от БИ. Для подключения дефектоскопа ПМД-70 имеется сеть 220 В 50 Гц.

Последовательность выполнения работ найдем, используя графы 1, 8, 9 табл. 12 и рис. 4.23. Пользоваться табл. 12 следует так же, как и табл. 11.

Глава 5

ТОКОВИХРЕВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

§ 5.1. Задачи, решаемые методом вихревых токов в полевых условиях

Метод вихревых токов (ВТ) относится к косвенным методам контроля, при котором свойства изделий оцениваются по сигналу (например, по отклонению стрелки микроамперметра), многократно преобразованному из одной физической величины в другую. Сущность такого контроля состоит в наблюдении (после преобразования) изменений ВТ, протекающих в проверяемой детали (или ее части), относительно ВТ в детали (или ее части), свойства которой считают приемлемыми. Значения амплитуды и фазы ВТ зависят от физико-механических свойств материала, его сплошности, размеров и формы детали, расстояния от датчика до металлической поверхности детали.

Особенности контроля методом ВТ в условиях эксплуатации авиационной техники изложены в гл. 1. В этих условиях его используют в основном для выявления поверхностных и подповерхностных (в слое до 1 мм) дефектов сплошности в деталях различной формы из немагнитных сплавов. В отдельных случаях его применяют для определения марки материала или значительных изменений структуры некоторых сплавов. Наибольшие преимущества метода ВТ проявляются при контроле деталей с защитными покрытиями, небольших по площади участков, деталей, расположенных в труднодоступных местах конструкции, при поиске малораскрытых трещин, при контроле отверстий и т. д. Этот метод в эксплуатации может быть применен также для измерения толщины изделий или покрытий на них.

Кроме общих условий эффективного применения МНК на аэродромах (см. гл. 1) специфическими условиями для метода ВТ при поиске несплошности материала являются следующие:

— не должно быть резко выраженной неоднородности свойств материала по всей зоне контроля (практически невозможно эффективно контролировать сварные швы стальных узлов, лопатки компрессора из ферромагнитного материала, на которых имеются прижоги, участки наклепа; участки, непосредственно примыкающие к стальным крепежным деталям, и т. д.);

— не должно быть значительных изменений формы поверхности в пределах зоны контроля (сложно контролировать, например, галтельные переходы вдоль замка лопаток роторов турбин и компрессоров авиационных двигателей);

— не должно быть существенных изменений толщины детали по всей зоне контроля, если толщина соизмерима с глубиной проникновения ВТ (см. далее).

В промышленности, на транспорте, в энергетике нашел широкое применение метод основной гармоники ВТ, рассматриваемый далее. Другие методы ВТ (высших гармоник, импульсный, многопараметровый) находятся в стадии исследований и отработки аппаратуры.

§ 5.2. Датчики вихревых токов

Чувствительными элементами (датчиками), которые позволяют получить сигнал о сплошности и других свойствах проверяемой детали, являются катушки индуктивности (рис. 5.1).

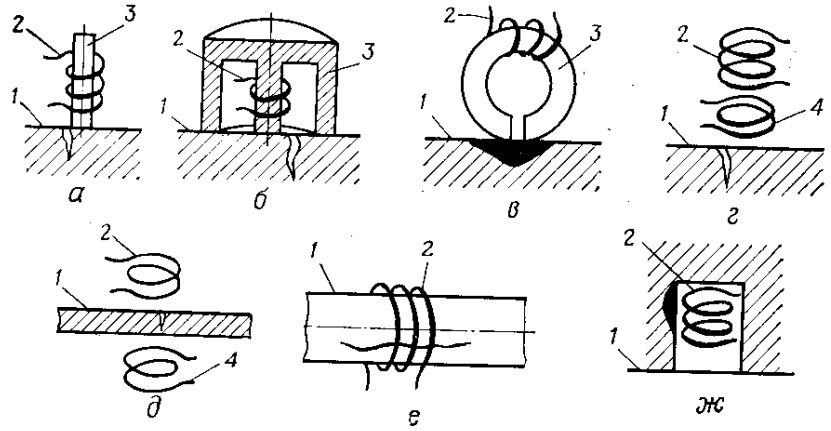


Рис. 5.1. Основные типы датчиков:
а, б, в — накладные параметрические с сердечниками; *г* — накладной трансформаторный; *д* — экранный; *е* — проходной наружный; *ж* — проходной внутренний; *1* — проверяемая деталь; *2* — возбуждающая обмотка; *3* — сердечник; *4* — вторичная обмотка

По виду электрической величины на выходе различают параметрические и трансформаторные датчики. В первых, однообмоточных (рис. 5.1, *а, б, в, е, ж*), сигналом является приращение комплексного (активного и индуктивного) сопротивления. Сигнал создается в той же обмотке, по которой идет возбуждающий ток. Во вторых, двухобмоточных, датчиках (рис. 5.1, *г, д*), сигналом является приращение комплексного напряжения, создаваемое в измерительной (вторичной) обмотке.

По расположению обмоток относительно детали выделяют накладные (рис. 5.1, *а, б, в, г*), наружные проходные (рис. 5.1, *е*) и внутренние проходные (рис. 5.1, *ж*) датчики.

По части поля, создающей сигнал, различают датчики отраженного деталью поля (рис. 5.1, *а, б, в, г, е, ж*) и датчики проходящего сквозь деталь поля, или экранные (рис. 5.1, *д*).

Датчики могут содержать в качестве концентраторов магнитного поля ферромагнитные (чаще ферритовые) сердечники различной формы, например стержневые, броневые, тороидальные со щелью (рис. 5.1, *а, б, в*). Диаметр и длина применяемых датчиков могут быть от миллиметра до метра. От размеров датчика (в первую очередь от диаметра) зависит минимальный размер выявляемой несплошности, т. е. чувствительность дефектоскопа.

Наружные проходные датчики применяют для контроля прутков, проволоки, профилей, труб, шаров, роликов, обойм подшипников, крепежа и т. д. Внутренними проходными проверяют трубы, отверстия. Экранными контролируют листы, ленты (накладными) или трубы (проходными). Эти типы датчиков используют в основном при производстве изделий.

Наиболее универсальными являются накладные датчики. Они пригодны для контроля изделий практически любой формы и размеров. Токовихревые дефектоскопы ВДЦ-1М, ВДЦ-2, ВД-1ГА, ППД-1, ДНМ-15, ДНМ-500 содержат малогабаритные накладные параметрические и трансформаторные датчики с ферритовыми сердечниками.

5.3. Возбуждение и распределение вихревых токов в проверяемой детали

Рассмотрим, как возбуждаются ВТ в немагнитном материале накладным цилиндрическим датчиком без сердечника (рис. 5.2).

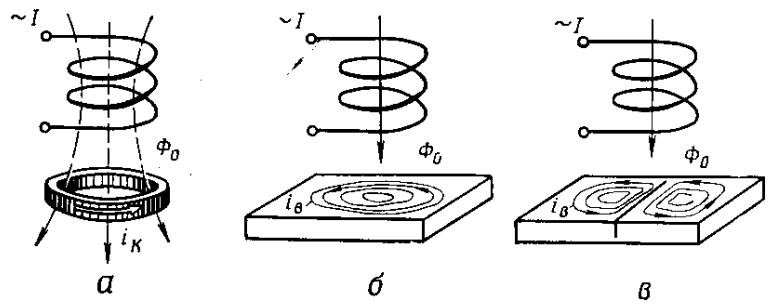


Рис. 5.2. Возбуждение вихревых токов:
а — в кольце; *б* — в сплошном материале; *в* — в материале с трещиной

Проходящий по обмотке датчика переменный ток I образует в пространстве вокруг него переменное магнитное поле, значение потока которого равно Φ_0. Для краткости поле у датчика будем изображать одной стрелкой (рис. 5.2, *б, в*). Если в это поле поместить металлическое кольцо (рис. 5.2, *а*), в нем в соответствии с

законом электромагнитной индукции будет наведена ЭДС и пойдет переменный ток $i_к$. То же наблюдается, если поместить в поле датчика часть металлической детали: непосредственно под ним внутри детали во множестве замкнутых контуров, соосных с датчиком, возбудятся ЭДС и пойдут токи $i_в$ (рис. 5.2, *б*). Токи, воз-

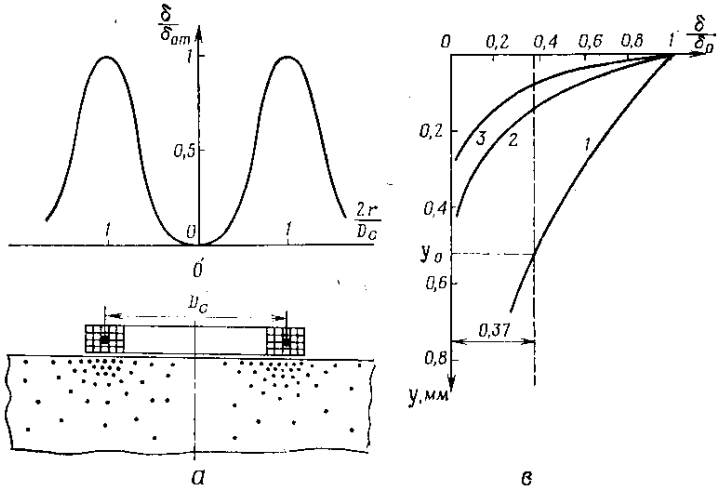


Рис. 5.3. Распределение вихревых токов:
а — следы траекторий вихревых токов на секущей плоскости; *б* — зависимость плотности δ/δ_{0m} от расстояния до оси датчика; *в* — зависимость плотности δ/δ_0 от расстояния до поверхности

буждаемые в металлических телах переменным во времени магнитным полем, называют **вихревыми**. Траектории ВТ, наведенных полем цилиндрического датчика, если в этом месте детали нет несплошностей, представляют собой замкнутые окружности. Если же в детали под датчиком окажется трещина, то ВТ будут обтекать ее с обеих сторон. Траектории ВТ и в этом случае остаются замкнутыми. Большая трещина разделит контуры ВТ на две части (рис. 5.2, *в*).

При смещении датчика на другой участок детали ВТ на прежнем месте исчезают, появляясь под датчиком на новом месте. Метод ВТ является методом локального контроля, поэтому датчик необходимо помещать в каждую точку проверяемой зоны детали.

Вихревые токи возбуждаются независимо от того, прижат ли датчик к поверхности детали или между ними есть воздушный зазор, смазка, слой защитного покрытия.

Распределение ВТ в детали неравномерное как по поверхности, так и по глубине. Картина распределения ВТ показана на рис. 5.3, *а*, где точками изображены следы траекторий ВТ на секущей плоскости, проходящей через ось датчика.

Зависимость относительной плотности ВТ δ/δ_{0m} от относительного расстояния до оси датчика $2r/D_c$ приведена на рис. 5.3, *б*, где

δ_{om} — максимальная плотность ВТ, А/м²; r — координата точки наблюдения, м; D_c — средний диаметр датчика, м.

Контур, в котором протекают ВТ максимальной плотности, называют эквивалентным контуром ВТ. Диаметр этого контура равен приблизительно среднему диаметру плоского датчика, прижатого к детали. Значение максимума δ_{om} тем больше, чем выше удельная электропроводность детали или частота возбуждения. При отводе датчика от детали значение плотности δ в каждой точке уменьшается, а диаметр эквивалентного контура ВТ растет. Плотность ВТ равна нулю при $2r/D_c=0$, а также на некотором удалении от датчика. Если дефект расположен за кругом, в пределах которого существуют ВТ, он не будет обнаружен.

Особенностью протекания ВТ, влияющей на области их применения в дефектоскопии, является поверхностный эффект, который заключается в стремлении ВТ концентрироваться в поверхностных слоях детали, расположенных ближе всего к датчику. ВТ (и возбуждающее их поле) по мере углубления в деталь ослабевают приблизительно по закону

$$\delta_y = \delta_0 e^{-\kappa y},$$

где δ_y и δ_0 — значения плотности ВТ соответственно на глубине y и на поверхности, А/м²;

y — глубина, м;

$\kappa=\sqrt{\pi f \sigma \mu}$ — коэффициент ослабления, 1/м;

e — основание натуральных логарифмов;

f — частота, 1/с;

σ — удельная электропроводность проверяемого материала, См/м;

μ — магнитная проницаемость проверяемого материала, Гн/м; в случае контроля немагнитного материала $\mu=\mu_0=1{,}26\cdot10^{-6}$ Гн/м.

Поверхностный эффект проявляется тем сильнее, чем выше частота f, больше электропроводность σ и магнитная проницаемость μ материала детали.

На рис. 5.3, *в* приведены графики, характеризующие ослабление ВТ: *1* — в жаропрочном материале ($\sigma=0{,}65\cdot10^6$ См/м), *2* — в магниевом сплаве ($\sigma=9{,}8\cdot10^6$ См/м), *3* — в алюминиевом сплаве ($\sigma=25\cdot10^6$ См/м) при частоте 1,5 МГц, на которой работает дефектоскоп ВДЦ-1М.

Для количественной оценки ослабления ВТ в различных металлах и при различной частоте введено понятие условная глубина проникновения ВТ, обозначенная y_0. Это — расстояние от поверхности, на котором плотность ВТ в e раз меньше, чем на поверхности, что соответствует уменьшению ее до 0,37 δ_0. Глубина проникновения есть величина, обратная коэффициенту ослабления κ:

$$y_0 = \frac{1}{\kappa} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}}.$$

На частоте 1,5 МГц глубина проникновения ВТ в немагнитный материал равна: при $\sigma_1=0{,}65\cdot10^6$ См/м — 0,53 мм; при $\sigma_2=9{,}8\cdot10^6$ См/м — 0,14 мм; при $\sigma_3=25\cdot10^6$ См/м — 0,08 мм. Значения y_0 при контроле различных немагнитных материалов на частотах от 10 Гц до 100 МГц можно определить по графику на рис. 5.4.

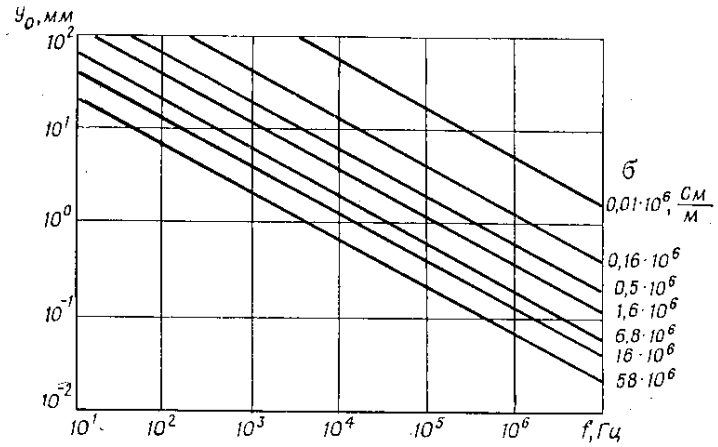


Рис. 5.4. Зависимость глубины проникновения вихревых токов от частоты возбуждения и электропроводности немагнитных материалов

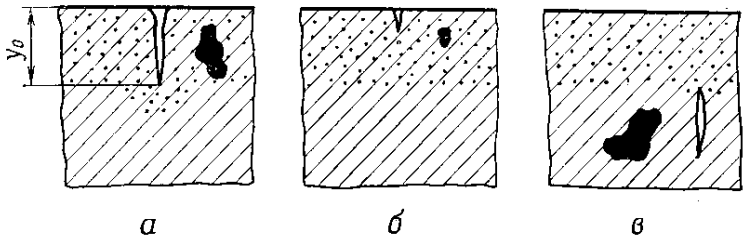


Рис. 5.5. Положение несплошностей различных размеров относительно слоя глубиной y_0:

а — несплошности надежно выявляются; *б* — несплошности могут быть пропущены; *в* — несплошности не могут быть обнаружены

Из формулы для коэффициента κ видно, что множество сочетаний переменных σ, f, μ могут привести к одному и тому же ослаблению ВТ, т. е. в различных физических условиях можно наблюдать одинаковое распределение ВТ. Так, например, график 1 на рис. 5.3, *в* показывает, как распределены ВТ при $f=1{,}5$ МГц и $\sigma_1=0{,}65\cdot10^6$ См/м. Однако в соответствии с этим же графиком ВТ

будут распределены так же и при $f=100$ кГц и $\sigma_2=9{,}8\cdot10^6$ См/м, и при $f=40$ кГц и $\sigma_3=25\cdot10^6$ См/м и др.

Если глубина поверхностной и подповерхностной несплошности близка к глубине проникновения y_0 или больше нее, то такая несплошность (рис. 5.5, *а*) надежно обнаруживается методом ВТ. Если глубина несплошности значительно меньше y_0 (рис. 5.5, *б*), то она может быть не выявлена. Несплошность, расположенная глубже слоя, в котором протекают ВТ (рис. 5.5, *в*), не выявляется.

§ 5.4. Формирование сигнала датчика

Подобно тому, как ток, протекающий по обмотке датчика, создает в пространстве магнитное поле, образуют магнитное поле над проверяемым участком детали и ВТ (рис. 5.6).

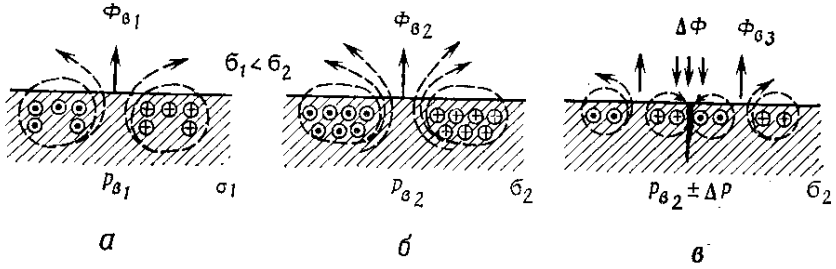


Рис. 5.6. Картины магнитного поля вихревых токов у поверхности детали без трещины (*а* и *б*) и с трещиной (*в*)

Значение потока ВТ $\Phi_в$ зависит от электропроводности, магнитной проницаемости и сплошности проверяемого материала. Он меньше, если меньше электропроводность (рис. 5.6, *а*, *б*): $\Phi_{в_1}<\Phi_{в_2}$. Нормальная составляющая магнитного потока ВТ в любой момент направлена навстречу нормальной составляющей возбуждающего потока Φ_0 датчика. При отсутствии несплошности в детали под датчиком пространственная картина магнитного поля ВТ имеет осевую симметрию. Если под датчиком есть трещина, то осевая симметрия нарушается, так как меняются траектории ВТ (рис. 5.6, *в*). Часть ВТ, обтекающих трещину с двух сторон в противоположных направлениях, создает над ней дополнительное поле дефекта, нормальная составляющая которого направлена так же, как нормальная составляющая возбуждающего поля. Поток поля дефекта обозначен $\Delta\Phi$.

Магнитный поток ВТ является величиной, формирующей в датчике сигнал. Дополнительный поток $\Delta\Phi$ вызывает приращение этого сигнала при наличии дефекта. Поток ВТ и его приращения тем больше, чем больше возбуждающий поток Φ_0 и чем ближе к детали расположен датчик.

При протекании ВТ наблюдается, кроме образования магнитного поля $\Phi_в$, и другое явление: превращение электрической энергии в теплоту. Это превращение происходит на электрическом сопротивлении, которое ВТ испытывают со стороны материала детали. Энергия, превращающаяся в теплоту за единицу времени (потери мощности), обозначена $P_в$. Если поток ВТ $\Phi_в$ с ростом электропроводности материала (в пределах 0—∞) растет, то потери мощности на ВТ $P_в$ вначале увеличиваются, а затем падают до нуля (рис. 5.7). Аналогичные закономерности для $\Phi_в$ и $P_в$ наблюдаются при увеличении частоты от нуля до бесконечности.

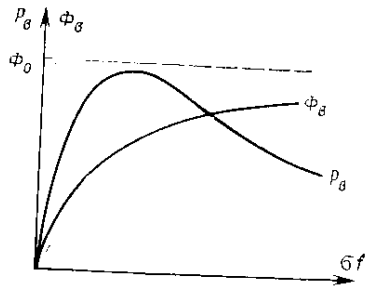


Рис. 5.7. Зависимость магнитного потока вихревых токов и потерь мощности на вихревые токи от электропроводности материала и частоты

Энергия, превращающаяся внутри детали в теплоту, поступает из датчика, который можно рассматривать как генератор электрической энергии. Поэтому потери мощности на ВТ приводят к изменению параметров (активного сопротивления) датчика и являются величиной, которая вместе с магнитным потоком ВТ формирует сигнал датчика. Потери мощности на ВТ тем больше, чем больше возбуждающий поток Φ_0 и чем ближе к детали расположен датчик. Так как при контроле используют датчики небольшой мощности, нагревание детали за счет потерь на ВТ трудно зарегистрировать. При большой мощности индуктора (катушки индуктивности) происходит разогревание поверхностных слоев детали ВТ до высокой температуры. Этот эффект используют для индукционной закалки при изготовлении деталей.

Рассмотрим, как величины $\Phi_в$ и $P_в$ трансформируются в сигнал параметрического датчика — индуктивное и активное сопротивление.

В режиме холостого хода активное сопротивление датчика R_0 (рис. 5.8, *г'*) определяется через потери мощности в самом датчике P_0, а его индуктивность L_0 — через возбуждающий магнитный поток Φ_0: $R_0=P_0/I^2$, $L_0=\Phi_0/I$. В токовихревых дефектоскопах $I=\text{const}$ (I — сила тока в обмотке), так как датчики подключают к электронному генератору с большим внутренним сопротивлением. Вообще $R\equiv P$, $L\equiv\Phi$. Отсюда видно, что изменения сопротивления R или индуктивности L датчика вызовут пропорциональные изменения потерь мощности и потока, и наоборот, изменения P и Φ вызовут пропорциональные изменения R и L. Полное сопротивление датчика принято изображать на комплексной плоскости, откладывая по мнимой оси индуктивное сопротивление ωL, по вещественной оси — активное сопротивление R (рис. 5.8, *г'*). Точка $\sigma=0$ с координатами R_0 и ωL_0 определяет пол-

ное сопротивление датчика Z_0 в режиме холостого хода. Его также изображают отрезком (вектором), соединяющим начало координат и точку $\sigma=0$.

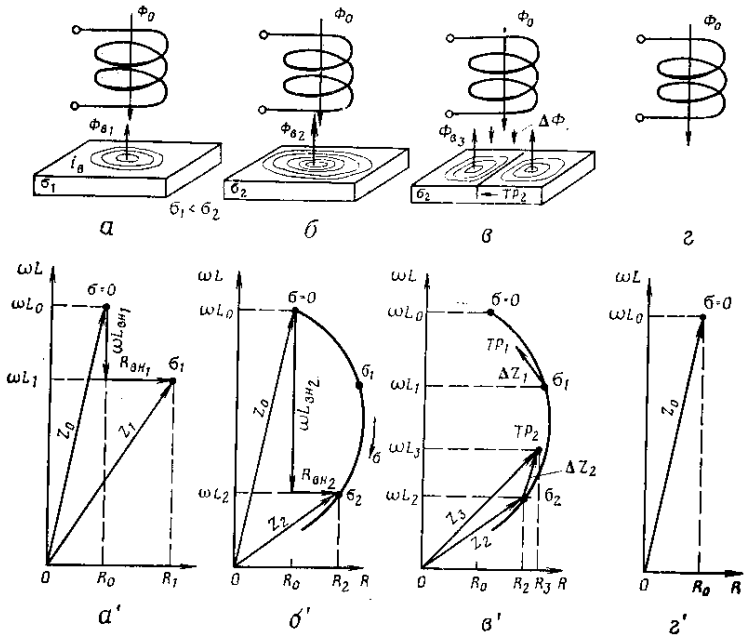


Рис. 5.8. Формирование сигнала датчика и его изображение на комплексной плоскости

Проанализируем, что происходит с величинами ωL и R при возбуждении ВТ (рис. 5.8, *а*, *б*, *в*). Через витки обмотки датчика, помещенного на деталь, у которой электропроводность материала равна, например σ_1 (рис. 5.8, *а*), проходят два встречно направленных потока — возбуждающий Φ_0 и поток ВТ $\Phi_{в_1}$. Результирующий поток равен их разности: $\Phi_1=\Phi_0-\Phi_{в_1}$. В этом случае индуктивность L_1 датчика равна $\frac{\Phi_1}{I}$, т. е. будет меньше, чем его индуктивность L_0 в режиме холостого хода: $L_1=\frac{\Phi_0}{I}-\frac{\Phi_{в_1}}{I}=L_0-\frac{\Phi_{в_1}}{I}$. Величина $\frac{\Phi_{в_1}}{I}$ обусловлена ВТ; она появляется, когда датчик установлен на деталь и как бы вносится деталью, поэтому называется **вносимой индуктивностью** $L_{вн}$. Таким образом, в случае, рассматриваемом на рис. 5.8, *а*, $L_1=L_0-L_{вн_1}$.

Как уже отмечалось, энергия, превращающаяся в детали в теплоту, поступает из датчика. Поэтому потери мощности в датчике состоят из потерь в обмотке (и сердечнике) датчика и потерь ВТ в детали: $P_1=P_0+P_{в_1}$. В этом случае активное сопротивление R датчика равно $\frac{P_1}{I^2}$, т. е. будет больше, чем в режиме холостого хода: $R_1=\frac{P_0}{I^2}+\frac{P_{в_1}}{I^2}=R_0+\frac{P_{в_1}}{I^2}$. Величина $\frac{P_{в_1}}{I^2}$ обусловлена деталью и называется **вносимым активным сопротивлением** $R_{вн}$. Таким образом, в случае, рассматриваемом на рис. 5.8, *а*, $R_1=R_0+R_{вн_1}$.

Видим, что при размещении датчика на детали его индуктивное сопротивление уменьшается на величину $\omega L_{вн_1}$, а активное сопротивление увеличивается на величину $R_{вн_1}$, комплексное сопротивление Z изменяется на величину $Z_{вн_1}=R_{вн_1}-j\omega L_{вн_1}$, которая и является сигналом датчика.

Вычтя на комплексной плоскости (рис. 5.8, *а'*) из индуктивного сопротивления ωL_0 датчика в режиме холостого хода вносимое индуктивное сопротивление $\omega L_{вн_1}$ и добавив к активному сопротивлению R_0 вносимое активное сопротивление $R_{вн_1}$, получим точку σ_1 на плоскости, которая характеризует комплексное сопротивление датчика Z_1, помещенного на металл с электропроводностью σ_1.

При размещении датчика над металлом с бо́льшей электропроводностью σ_2 (рис. 5.8, *б*) поток ВТ увеличится по сравнению с предыдущим случаем и будет равен $\Phi_{в_2}$, а потери мощности на ВТ могут увеличиться или уменьшиться (см. рис. 5.7) до значения $P_{в_2}$. Соответственно этому изменятся вносимая индуктивность и вносимое активное сопротивление. Они будут равны $L_{вн_2}$ и $R_{вн_2}$. Для определения комплексного сопротивления датчика Z_2 необходимо найти координаты точки σ_2 на плоскости: $\omega L_0-\omega L_{вн_2}$ и $R_0+R_{вн_2}$ (рис. 5.8, *б'*). Переставляя датчик на металлы с возрастающей электропроводностью, получим на комплексной плоскости ряд точек, определяющих полное сопротивление датчика Z, а также полное вносимое сопротивление (сигнал датчика), соответствующее этим значениям σ. Соединив все точки σ линией, получим график зависимости Z датчика или $Z_{вн}$ от электропроводности. Такая же зависимость Z датчика и $Z_{вн}$ получается при $\sigma=\text{const}$, но при изменении частоты возбуждения ВТ от 0 до ∞.

Графики Z (σ, f и др.), показывающие зависимость сигнала датчика на комплексной плоскости от свойств материала детали, расстояния до датчика, формы детали, размеров дефекта и др., называют **годографами**.

Рассмотрим, что собой представляет сигнал датчика при наличии под ним дефекта. Пусть в детали с электропроводностью материала σ_2 под датчиком имеется трещина (рис. 5.8, *в*). Это приведет по сравнению со случаем, изображенным на рис. 5.8, *б*, к появлению дополнительного магнитного потока $+\Delta\Phi$, а также к увеличению или к уменьшению потерь мощности на ВТ на $\pm\Delta P$ (см. рис. 5.6, *в*). Результирующие поток и потери мощности датчика определяются выражениями $\Phi_3=\Phi_0-\Phi_{в_2}+\Delta\Phi$, $P_3=P_0+P_{в_2}\pm\Delta P$. Разделив первое из них на I, второе — на I^2, получим

$L_3 = L_0 - L_{вн_2} + \Delta L$, $R_3 = R_0 + R_{вн_2} \pm \Delta R$. Таким образом, при наличии трещины индуктивность датчика увеличивается, вносимая индуктивность уменьшается, активное сопротивление датчика и вносимое активное сопротивление могут увеличиться, уменьшиться или не измениться — это зависит от того, при каких значениях произведения σf выполняется контроль.

На рис. 5.8, *в′* приращение сигнала, вызванное трещиной, изображено вектором ΔZ_2.

Вектор Z_3, соединяющий начало координат с точкой TP_2, изображает полное сопротивление датчика, установленного на деталь с трещиной. На рис. 5.8, *в′* показан также сигнал (вектор ΔZ_1) датчика, вызванный трещиной в материале с электропроводностью σ_1.

Для наблюдения изменений вносимого индуктивного и активного сопротивлений датчика, обусловленных изменением ВТ, их преобразуют с помощью электрических схем в изменения напряжения или тока.

§ 5.5. Мешающие факторы при контроле деталей на сплошность

В процессе контроля на сигнал датчика могут оказывать влияние различные факторы. Два из них мы рассмотрели при анализе рис. 5.8 — это изменение электропроводности и наличие несплошности. Если контроль проводят с целью выявления трещин, а материал детали имеет резко выраженную структурную неоднородность, то обусловленные ею колебания электропроводности от участка к участку детали могут привести к таким значительным изменениям сигнала датчика, что на их фоне практически невозможно будет заметить сигнал от трещины. Особенно сильно влияет на сигнал неоднородность свойств магнитных материалов. При выявлении дефектов структурная неоднородность материала детали является фактором, мешающим проведению контроля.

Влияние других мешающих факторов, связанных с изменением формы контролируемой зоны и положения датчика относительно детали, на сигнал рассмотрено на рис. 5.9 с помощью годографов $Z(\sigma, h', \varphi, x, d)$. В отличие от рис. 5.8 на рис. 5.9 по осям отложены не сопротивления датчика ωL и R, а вносимые нормированные сопротивления $\frac{\omega L_{вн}}{\omega L_0}$, $\frac{R_{вн}}{\omega L_0}$ (начало координат перенесено в точку $\sigma = 0$ с координатами $\frac{\omega L_0}{\omega L_0}$, $\frac{R_0}{\omega L_0}$).

Датчик, плотно прижатый к поверхности детали, показан на рис. 5.9, *а*. В металл проникает некоторая часть его магнитного потока Φ_{01}. Сигнал датчика при увеличении частоты возбуждения и электропроводности материала изменяется по годографу вниз. При $f\sigma \to \infty$ (случай возбуждения ВТ в сверхпроводнике или возбуждения ВТ в проводнике, но на сверхвысокой частоте) наблю-

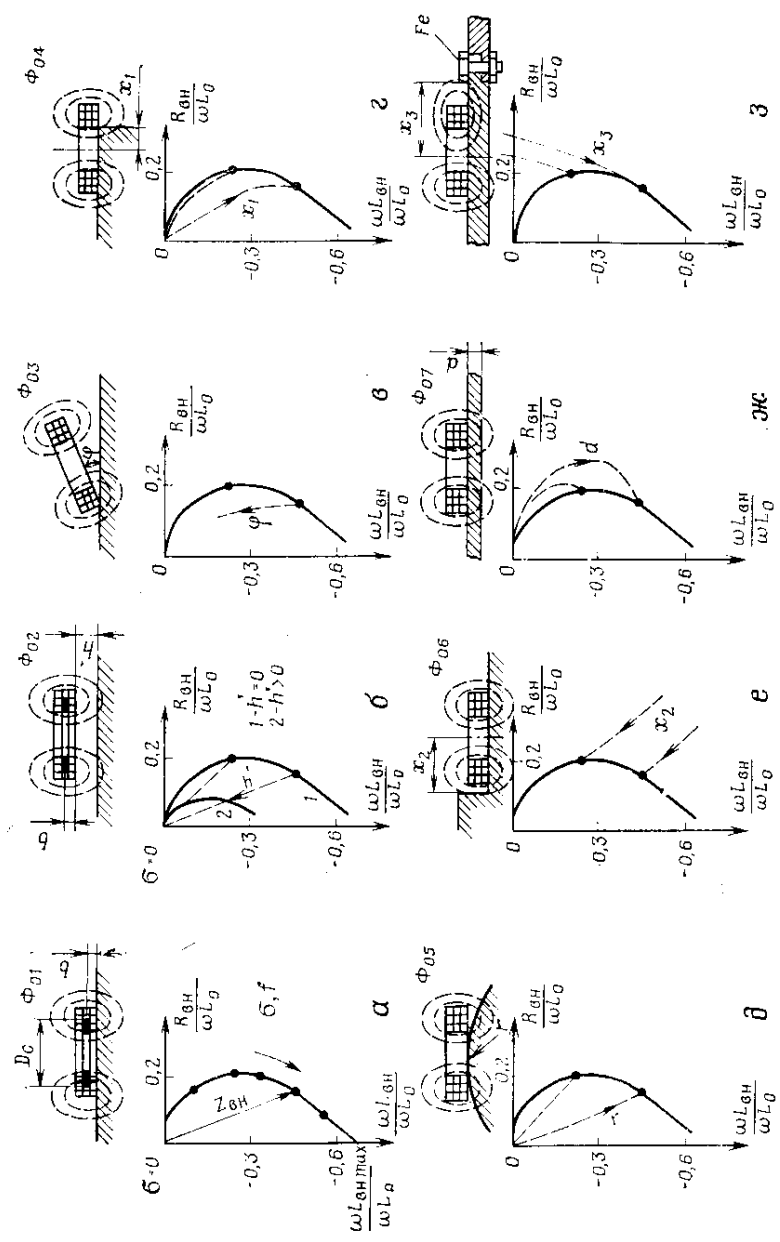


Рис. 5.9. Влияние мешающих факторов на сигнал датчика

дается полное отражение металлом возбуждающего потока: $\Phi_в = \Phi_{01}$. При этом создается максимально возможная для данной конструкции датчика вносимая индуктивность $L_{вн\,max}$, а вносимое активное сопротивление равно нулю.

При изменении формы зоны контроля и положения относительно нее датчика изменяется магнитный поток, проникающий в металл Φ_0, изменяются также плотность ВТ, магнитный поток ВТ $\Phi_в$, потери мощности на ВТ $P_в$ и, следовательно, составляющие сигнала датчика $\omega L_{вн}$, $R_{вн}$.

Если датчик отвести от детали на некоторое расстояние h' (рис. 5.9, *б*) и изменять частоту или электропроводность в пределах $0 - \infty$, то сигнал датчика будет изменяться по другому, меньшему, годографу *2*, остающемуся подобным годографу *1*, для которого $h'=0$.

При отводе датчика от металла (если не менять электропроводность и частоту) сигнал изменяется по линии $Z(h')$, близкой к прямой, идущей в начало координат. Каждой точке годографа $Z(\sigma, f)$ соответствует своя линия отвода датчика $Z(h')$. Если датчик удалить от детали на значительное расстояние, то сигнал, обусловленный деталью, будет равен нулю, что соответствует точке $\sigma=0$.

При расчетах обычно используют не расстояние h' от поверхности детали до торца датчика, а расстояние до среднего витка $h=h'+b$.

Перекос датчика относительно детали (рис. 5.9, *в*) также уменьшает значение потока, проникающего в деталь. Значение сигнала в этом случае уменьшается по годографу $Z(\varphi)$.

Уменьшается поток, возбуждающий ВТ, при сходе датчика на край детали (рис. 5.9, *г*). Сигнал в этом случае уменьшается до нуля по годографу $Z(x_1)$.

Если радиус прутка, трубы (рис. 5.9, *д*) уменьшать от $r = \infty$ до $r = 0$, то сигнал датчика будет уменьшаться по годографу $Z(r)$, также идущему в начало координат. Стрелки указывают направления изменения $Z_{вн}$ при увеличении переменной r и других переменных.

При приближении датчика к выступу (рис. 5.9, *е*) или при погружении его в паз или в отверстие значение потока, проникающего в деталь, по сравнению со случаем, изображенным на рис. 5.9, *а*, увеличивается. Это приводит к росту сигнала датчика до некоторой величины по годографу $Z(x_2)$ вниз.

Уменьшение толщины детали d (рис. 5.9, *ж*) в пределах глубины проникновения ВТ ($d<y_0$) изменяет сигнал датчика по годографу $Z(d)$, заканчивающемуся в начале координат.

Если приближать датчик к магнитной детали, например к болту (рис. 5.9, *з*), то начиная с некоторого расстояния x_3 часть потока будет проходить не по воздуху, а по магнитопроводу, обладающему меньшим магнитным сопротивлением. Это приведет к росту общего потока датчика. Кроме того, в магнитном болте

возбуждаются ВТ, вследствие чего значительно возрастают потери мощности. Поэтому сигнал датчика по мере приближения к болту изменяется по годографу $Z(x_3)$, идущему вверх.

В каждом из рассмотренных на рис. 5.9. случаев ВТ возбуждаются различными по значению магнитными потоками Φ_{01}, Φ_{02}, Φ_{03},... и годографы изменения $Z_{вн}$ под влиянием мешающих факторов получаются разными. Очевидно, что при контроле детали все мешающие факторы могут проявиться и вызвать сигнал бóльший, чем сигнал о несплошности. Если бы не были разработаны способы уменьшения влияния на показания дефектоскопов мешающих факторов, то практическое применение метода ВТ было бы невозможным.

Однако каждый мешающий фактор по-своему меняет полное вносимое сопротивление. Поэтому уменьшить влияние всех их одним способом не удается.

Несколько способов уменьшения влияния мешающих факторов изложены при описании дефектоскопов.

Рассмотренные для накладного параметрического цилиндрического (без сердечника) датчика закономерности изменения вносимых сопротивлений являются общими почти для всех типов датчиков.

§ 5.6. Дефектоскоп ВДЦ-1М

Дефектоскоп ВДЦ-1М (рис. 5.10) используют для выявления поверхностных и подповерхностных (в слое глубиной 0,5 мм) трещин, пористости, включений, рыхлот и других несплошностей на деталях, изготовленных из немагнитных материалов с электропроводностью $0{,}1 \cdot 10^6$ См/м и более (графит, жаропрочные стали, магниевые, титановые, алюминиевые, медные сплавы) без удаления с поверхности деталей защитных покрытий толщиной менее 0,3 мм. Его можно применять для контроля магнитных деталей, однородных по структуре.

Дефектоскоп ВДЦ-1М, как и другие, позволяет определять место расположения несплошности, а также приближенно ее размеры. Кроме выявления несплошности, этим прибором можно обнаруживать значительные отклонения в электропроводности материала от требований чертежа, например изготовление детали из сплава другой марки, отклонение в толщине тонких деталей из-за коррозии и т. д. Обнаружение дефектов производится по загоранию лампочек и показаниям микроамперметра. Модификацией этого прибора является дефектоскоп ВДЦ-2, отличающийся тем, что, кроме перечисленных индикаторов, в нем установлен звуковой сигнализатор.

Дефектоскоп укомплектован тремя типами искательных головок (табл. 13), одна из них имеет шесть типов сменных датчиков.

Указанной в табл. 13 чувствительности (по длине трещины) можно достичь при удобном подходе к зоне контроля (практиче-

Таблица 13

Данные искательных головок типа ВГ дефектоскопа ВДЦ-1М

Показатели	ВГ-1	ВГ-2						ВГ-3
	—	Д-1	Д-2	Д-3	Д-4	Д-5	Д-6	—
Тип датчика	—	Конус	Цилиндр ∅ 11 мм с выступом	Цилиндр ∅ 14 мм	Цилиндр ∅ 6 мм	Цилиндр ∅ 26 мм	Г-образный	См. рис. 5.10, *г*
Форма и размеры корпуса	См. рис. 5.11							
Тип сердечника	Стержень ∅ 1,8 мм	Стержень ∅ 1,8 мм	Стержень ∅ 1,8 мм	Полуброневой ∅ 12 мм	Стержень ∅ 1,8 мм	Полуброневой ∅ 23 мм	Стержень ∅ 1,8 мм	Полуброневой ∅ 23 мм
Применение предпочтительно для контроля	Кромок лопаток	Галтелей радиусом более 2 мм и др.	Ребер, краевых зон	Плоских шероховатых поверхностей	Пазов шириной более 6 мм, галтелей и др.	Больших (шероховатых) поверхностей незначительной кривизны	Внутренних поверхностей	Цилиндрической и конической поверхностей барабанов и реборд авиационных колес
Минимальная длина выявляемой трещины, мм (глубиной 0,3—0,5 мм, шириной 1 мкм)	1,5	1,5	1,5	3	1,5	6	1,5	6

ски в лабораторных условиях) при чистоте обработки поверхности не ниже ▽ 5 и перемещении датчика с шагом, равным половине диаметра сердечника или менее. При ограниченных подходах к детали или по другим причинам, не позволяющим точно

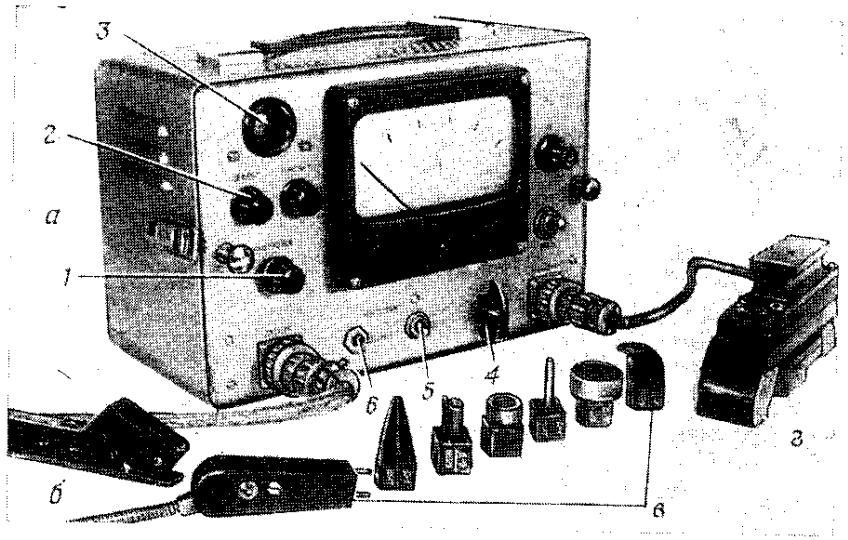


Рис. 5.10. Дефектоскоп ВДЦ-1М:

а — электронный блок; *б* — искательная головка ВГ-1; *в* — искательная головка ВГ-2 с комплектом датчиков; *г* — искательная головка ВГ-3; *1* — рукоятка НАСТРОЙКА; *2* — красная лампочка (Л5); *3* — экран; *4* — рукоятка БАЛАНС переменного резистора R5; *5* — тумблер групп датчиков; *6* — кнопка ПСК. ДЕФЕКТ.

выдерживать нужное положение датчика на детали, а также при грубой поверхности детали минимальная длина выявляемых трещин будет в 1,5—3 раза больше.

В головке ВГ-1 (рис. 5.11) катушка размещена в подвижном корпусе *1* и поджимается к кромке проверяемой лопатки пружиной *2*. Катушка касается кромки через шарик, вклеенный в торец стержневого сердечника всех датчиков для предохранения от износа. На противоположном торце корпуса установлен винт *3*, который при нажиме лопатки на шарик касается пластины *4*, замыкая цепь зеленых лампочек *6*, сигнализирующих о нормальном положении датчика на лопатке. Зазор между винтом *3* и пластиной *4* регулируется винтом *5*. В головке ВГ-2 датчики неподвижны относительно корпусов, а в головке ВГ-3 датчик связан с корпусом пластинчатой пружиной.

В корпусах головок всех типов смонтированы миниатюрные красные лампочки, вспыхивающие при обнаружении дефекта. Последовательно с лампочкой на головке соединена красная лампочка, установленная на лицевой панели дефектоскопа.

Дефектоскоп ВДЦ-1М можно доукомплектовывать датчиками

различной формы, приспособленными для контроля специфических зон на деталях. Для его настройки с некомплектным датчиком необходимо, чтобы индуктивность и активное сопротивление этого датчика, помещенного в рабочем положении на проверяемую деталь, были близки к значениям этих величин одного из комплектных датчиков, находящегося в том же положении на детали.

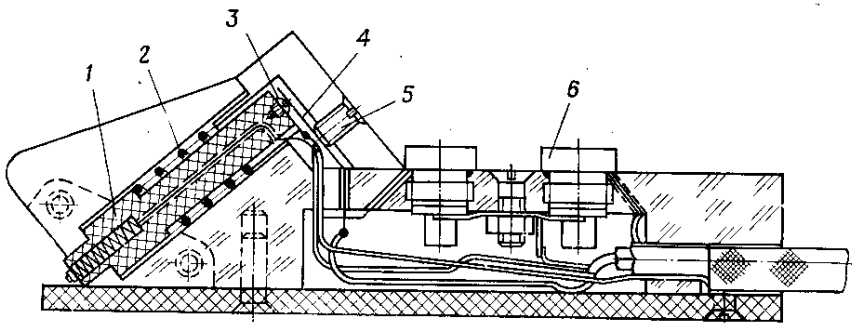


Рис. 5.11. Устройство искательной головки ВГ-1:
1 — корпус с датчиком; *2* — пружина; *3* и *5* — винты; *4* — пластина; *6* — лампочка

Дефектоскоп питают от сети постоянного тока через встроенный полупроводниковый стабилизатор, обеспечивающий нормальную работу дефектоскопа при плавном изменении напряжения

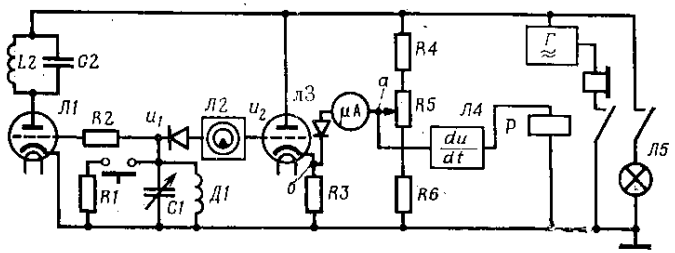


Рис. 5.12. Упрощенная электрическая схема дефектоскопа ВДЦ-1М (ВДЦ-2)

питания в пределах 22—30 В. Подключать дефектоскоп к источникам с повышенной пульсацией, например к выпрямителям без специального фильтра, нельзя.

Габариты дефектоскопа — 280×160×180 мм; масса — 4кг.

Дефектоскоп ВДЦ-1М выполнен на лампах и полупроводниках. Полупроводниковыми являются только стабилизатор и преобразователь напряжения.

Рассмотрим принцип работы дефектоскопа ВДЦ-1М по упрощенной электрической схеме (рис. 5.12). Основными узлами ее являются:

— двухконтурный автогенератор, собранный на лампе *Л1*, в

сеточный измерительный контур которого входят датчик *Д1*, конденсатор переменной емкости *C1*, регулируемый рукояткой *1* (НАСТРОЙКА) (см. рис. 5.10), и резистор *R1*, являющийся имитатором дефекта; его включают кнопкой *6* (ИСК. ДЕФЕКТ.); при этом схема вырабатывает такой сигнал, как при обнаружении небольшой несплошности; номинал резистора *R1* меняют переключением тумблера *5* соответственно двум группам датчиков;

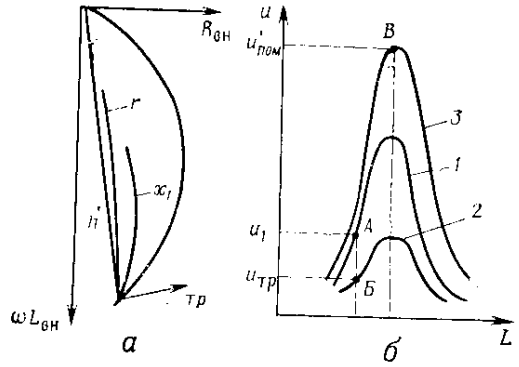


Рис. 5.13. Изменение сигнала датчика (*а*) и напряжения на измерительном контуре дефектоскопа ВДЦ-1М (*б*) при влиянии мешающих факторов и наличии дефекта (*1, 2, 3* — резонансные кривые)

— электронно-оптический индикатор настройки генератора *Л2*, используемый также для усиления выпрямленного напряжения, снимаемого с измерительного контура; экран *3* этого индикатора выходит на лицевую панель дефектоскопа.

— измерительный мост, состоящий из лампы *Л3* и резистора *R3* катодного повторителя, резисторов *R4, R5, R6;* в диагональ моста *аб* (рис. 5.12) включены микроамперметр и диод, отсекающий ток обратного направления; мост уравновешивают рукояткой *4* (БАЛАНС) (рис. 5.10) переменного резистора *R5;*

— электронное реле *Л4* задержки сигнала, поступающего через контакты электромеханического реле *Р* на красные лампочки *2* (*Л5*), а в дефектоскопе ВДЦ-2 — и на звуковой генератор.

Одним из недостатков некоторых других дефектоскопов является небольшая скорость перемещения датчика при контроле из-за инерционности индикаторов. Благодаря применению реле задержки сигнала при контроле дефектоскопом ВДЦ-1М скорость перемещения датчика может быть до 500 мм/с. В любом случае световой сигнал наблюдается в течение 2—3 с.

В дефектоскопе ВДЦ-1М можно практически полностью исключить показания, вызываемые мешающими факторами: отводом и перекосом датчика, уменьшением радиуса выпуклой поверхности детали, приближением к краю. Достигнуто это работой

дефектоскопа на высокой частоте (1—2,5 МГц). В этих условиях наличие несплошности вызывает в основном увеличение вносимого активного сопротивления датчика (рис. 5.13, *а*) и измерительного контура автогенератора, а уменьшение вносимой индуктивности существенно меньше. В то же время мешающие факторы — отвод от детали датчика на расстояние h', уменьшение радиуса поверхности r — вызывают уменьшение вносимого активного сопротивления и значительное уменьшение вносимой индуктивности. Лишь приближение датчика к краю детали выражается незначительным увеличением вносимого активного сопротивления и значительным уменьшением вносимой индуктивности. Эту помеху в приборе ВДЦ-1М можно отсечь без существенного снижения чувствительности к трещине. Напомним, что уменьшение вносимой индуктивности соответствует росту индуктивности датчика и, следовательно, контура *С1Д1*. Изменения L и R контур преобразует в изменение напряжения.

Способ уменьшения влияния мешающих факторов основан на том, что приращения напряжения, обусловленные этими факторами и несплошностью, имеют разные знаки. Пусть при размещении датчика в недефектном месте детали контур настроен в точке *А* резонансной кривой *1* (рис. 5.13, *б*). Этому состоянию соответствует: напряжение u_1 на выходе контура, выпрямленное и усиленное напряжение u_2 на входе катодного повторителя (рис. 5.12), ток, проходящий через его лампу, и потенциал $\varphi_{1б}$ в точке *б* диагонали моста. Рукояткой БАЛАНС резистора *R5* потенциал в точке *а* на другом конце диагонали изменяют до значения потенциала в точке *б*: $\varphi_а = \varphi_{1б}$, о чем свидетельствует отсутствие тока на микроамперметре. Значение напряжения u_1 на контуре перед уравновешиванием моста выбирают конденсатором *С1* (НАСТРОЙКА) по углу теневого сектора на экране электронно-оптического индикатора. Оптимальный угол (30—40°) указан на его обрамлении рисками.

При попадании датчика на трещину увеличивается вносимое активное сопротивление (рис. 5.13, *а*), увеличиваются потери в контуре. Контур переходит на работу по резонансной кривой *2* с меньшим максимумом, и напряжение на нем становится равным $u_{тр}$. В схеме (рис. 5.12) этому соответствует уменьшение напряжения на входе катодного повторителя, уменьшение тока через лампу и потенциала в точке *б* диагонали моста: $\varphi_{тр\,б} < \varphi_{1\,б}$. Так как потенциал в точке *а* диагонали не изменился, то $\varphi_{тр\,б} < \varphi_а$, что приведет к протеканию тока через микроамперметр в направлении проводимости диода. Возникшее напряжение на диагонали поступает на дифференцирующую цепочку электронного реле. Стрелка микроамперметра отклоняется, и реле срабатывает, включая лампочки.

При влиянии мешающего фактора уменьшение $R_{вн}$ приводит к тому, что контур переходит на работу по резонансной кривой *3* с большим максимумом, а уменьшение $L_{вн}$ смещает настройку

контура в точку *В*. В результате изменений $R_{вн}$ и $L_{вн}$ в этом случае напряжение на контуре относительно u_1 возрастает, что приводит к росту тока через лампу катодного повторителя и потенциала в точке *б*. Теперь к диагонали *аб* приложено напряжение противоположной полярности: $\varphi_{пом\,б} > \varphi_а$. Через диагональ должен был бы идти ток от точки *б* к точке *а*. Однако диод этот ток не пропускает, отсекая от индикаторов сигналы, вызванные влиянием на датчик мешающих факторов.

На экране электронно-оптического индикатора влияние отвода, перекоса датчика проявляется в уменьшении угла теневого сектора относительно исходного, а обнаружение несплошности сопровождается скачкообразным увеличением угла. При наличии под датчиком большой несплошности в контур вносится большое сопротивление, которое может нарушить условия устойчивой работы и вызвать срыв колебаний генератора. Переменное напряжение на контуре в этом случае становится равным нулю, а угол теневого сектора на экране максимальным (80—100°). Аналогичное явление наблюдается, например, при обрыве обмотки датчика или отсоединении искательной головки. Хотя отвод датчика от детали или его перекос, приближение к краю не вызывают показаний индикаторов (кроме электронно-оптического), однако отсекают «полезный» сигнал о наличии несплошности на уровне, равном сигналу мешающего фактора, что может снизить чувствительность. Это относится не только к дефектоскопу ВДЦ-1М, но и к ВДЛ-2М, ВД-1ГА, ППД-1. Поэтому необходимо следить за выдерживанием положения датчика при контроле и своевременно подстраивать прибор, например, при увеличении толщины покрытия, радиуса кривизны выпуклой поверхности детали и т. д.

§ 5.7. Дефектоскопы ВДЛ-2М, ВД-1ГА, ППД-1

Общим для дефектоскопов ВДЛ-2М, ВД-1ГА, ППД-1 и ВДЦ-1М является принцип уменьшения влияния на показания индикаторов мешающих факторов. Все они работают на относительно высокой частоте, содержат двухконтурный автогенератор с датчиком в сеточном контуре, мостовую схему, которая выделяет сигнал от несплошности, отсекая от индикаторов сигналы, вызванные некоторыми мешающими факторами. Поэтому рассмотрим лишь конструктивные особенности дефектоскопов ВДЛ-2М, ВД-1ГА, ППД-1.

Дефектоскоп ВДЛ-2М предназначен для контроля кромок лопаток турбин авиационных двигателей. Он укомплектован искательными головками типа ВГ-1 (рис. 5.11), работает на частоте 4—5 МГц, подключается к источнику постоянного (непульсирующего) тока со стабильным напряжением в диапазоне 25—28 В; встроенного стабилизатора не имеет. Габариты — 230×160×130 мм; масса — 2,5 кг.

Прибор ВДЛ-2М собран в основном по схеме прибора ВДЦ-1М (рис. 5.12). Однако в ВДЛ-2М отсутствуют электронное реле задержки сигнала (вследствие чего при контроле скорость перемещения датчика ограничена 5—10 мм/с) и имитатор дефекта. Проверку чувствительности производят по контрольному образцу — лопатке проверяемого типа с трещиной длиной 1 мм или

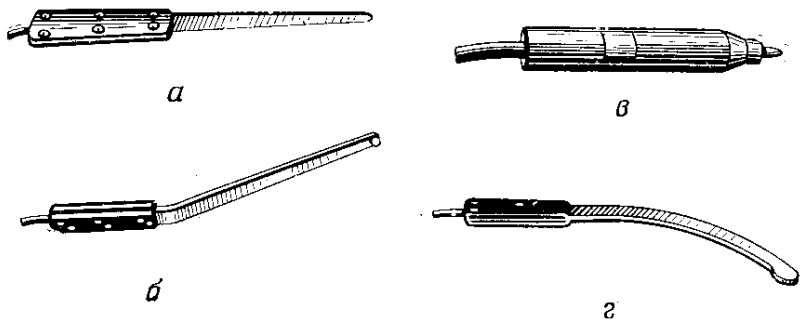


Рис. 5.14. Искательные головки дефектоскопа ВД-1ГА:
а — Щ-1 (нож); *б* — Щ-2 (Г-образная); *в* — Щ-3 (карандаш); *г* — Щ-4 (серп)

таким же по длине надрезом на кромке. В измерительном контуре дефектоскопа ВДЛ-2М установлен конденсатор, емкость которого изменяется в небольших пределах, вследствие чего этим прибором нельзя проверять кромки деталей, электропроводность которых выше $2 \cdot 10^6$ См/м и ниже $0{,}5 \cdot 10^6$ См/м.

Дефектоскоп ВД-1ГА, как и дефектоскоп ВДЦ-1М, можно применять для выявления дефектов в деталях различной формы, изготовленных из немагнитных материалов различной электропроводности, а также из структурно однородных магнитных материалов, в том числе при наличии защитных покрытий. В нем применены катушки диаметром 1,5 мм, содержащие ферритовые сердечники, с помощью которых можно обнаружить трещины длиной не менее 2 мм. Работает дефектоскоп на частоте 2—4 МГц от источников переменного напряжения 24 или 36 В 50 Гц. Индикаторами дефекта являются микроамперметр и звуковой сигнализатор — головной телефон.

Габариты дефектоскопа — 215×90×145 мм; масса — 3 кг.

Во время контроля дефектоскоп ВД-1ГА подвешивается через плечо на ремне. Скорость перемещения датчика при контроле ограничена 20 мм/с.

Прибор комплектуют четырьмя типами искательных головок:

— Щ-1 (нож) и Щ-4 (серп) (рис. 5.14, *а*, *г*) для обнаружения трещин по дну узких глубоких пазов шириной не менее 2,5 мм;

— Щ-2 (Г-образная) (рис. 5.14, *б*) для контроля деталей, перекрытых сопряженными деталями, например сварных роликовых швов на фланцах корпуса соплового аппарата турбины, для

контроля галтельных переходов, участков деталей у выступов и др.;

— Щ-3 (карандаш) (рис. 5.14, *в*) для контроля плоских участков деталей, галтелей, выступов, краевых и других зон при наличии открытых подходов.

Схема дефектоскопа ВД-1ГА (рис. 5.15) представляет собой мост, плечами которого являются: резистор *R1*, измерительный двухконтурный автогенератор, собранный на электронной лампе, резистор *R3*, переменный резистор *R4* и диод. В диагональ моста между точками *а* и *б* включены микроамперметр и полупроводниковый звуковой генератор. Генератор «запускается» при напряжении дисбаланса в диагонали 1,8—2 В. Частота и амплитуда этого генератора определяются уровнем постоянного напряжения, подведенного к диагонали *аб*, которое зависит от постоянной составляющей анодного тока, проходящего через лампу автогенератора. Настраивают дефектоскоп при размещении датчика в бездефектном месте контролируемой детали или контрольного образца. Этому соответствует определенный уровень переменного напряжения на измерительном контуре (см. u_1 на рис. 5.13, *б*) и определенный уровень тока через лампу. В таком состоянии резистором *R4* создают дисбаланс моста, равный 2,2 В, генератор возбуждается, и в телефоне появляется звук определенной высоты и интенсивности. При плавных изменениях электромагнитных свойств проверяемого материала, толщины стенки и кривизны поверхности происходят незначительные плавные изменения тона и интенсивности звука. Если под датчиком окажется несплошность, ток через лампу и напряжение в диагонали возрастут скачкообразно, в телефоне возникнет характерный сигнал — импульс высокого тона и большой интенсивности. В случае отвода датчика от детали звук в наушниках исчезнет, так как напряжение на контуре возрастет, ток через лампу уменьшится, в диагонали *аб* возникнет напряжение обратной полярности, звуковой генератор прекратит работу. Таким образом, звуковой генератор позволяет обнаруживать несплошность, отделять плавные изменения сигнала, не связанные с нею, и контролировать положение датчика на детали.

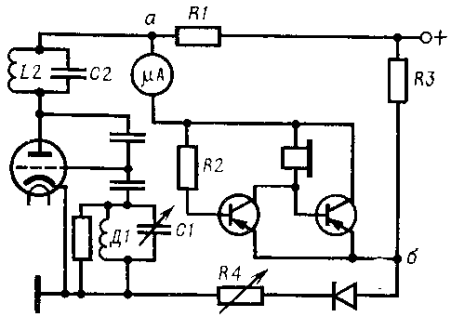


Рис. 5.15. Электрическая схема дефектоскопа ВД-1ГА

Если в дефектоскопе ВД-1ГА мост при настройке уравновесить (напряжение на диагонали и звуковом генераторе равно нулю), то звуковой сигнал начнет вырабатываться лишь при

обнаружении несплошности или при другом изменении свойств детали.

Дефектоскоп ППД-1 содержит в основном те же схемные узлы, что и описанные ранее дефектоскопы, но собраны они полностью на полупроводниковых элементах. Рабочая частота — 2 МГц. Масса прибора — 0,5 кг. Комплектуется датчиком диаметром 2 мм. В идеальных условиях контроля им можно выявить трещины длиной 1,5 мм, глубиной 0,5 мм. Может использоваться для контроля галтелей, ребер, плоских и криволинейных участков деталей, изготовленных из структурно однородных магнитных и немагнитных сплавов, обладающих электропроводностью $0{,}5 \cdot 10^6$ См/м и более. Питается дефектоскоп автономно от аккумулятора 7Д-01 или от батареи «Крона».

Существенным недостатком прибора ППД-1 является температурная нестабильность — высокие и низкие отрицательные температуры вносят искажения в показания ППД-1.

Дальнейшей модификацией этого прибора является ППД-2. Он должен комплектоваться датчиками нескольких типов.

§ 5.8. Дефектоскопы ДНМ-15, ДНМ-500

В дефектоскопах ДНМ-15 и ДНМ-500 применен способ, позволяющий исключать влияние на показания изменений зазора между датчиком и деталью в пределах от 0 до 1 мм

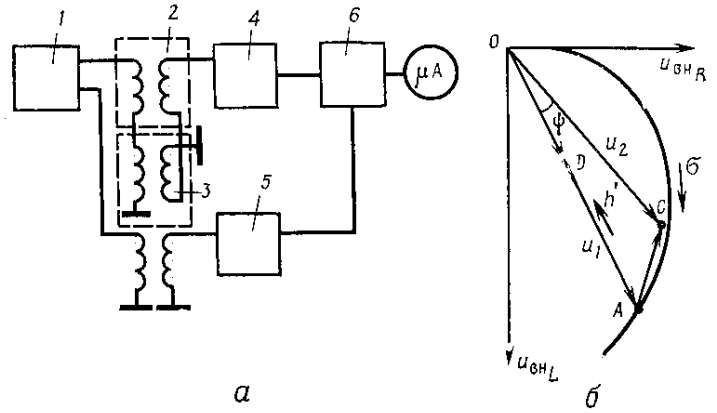


Рис. 5.16. Блок-схема дефектоскопа типа ДНМ (*а*) и векторная диаграмма изменений вносимых напряжений относительно линии отвода (*б*):

1 — генератор; *2* и *3* — трансформаторные датчики; *4* — усилитель; *5* — фазовращатель; *6* — фазовый различитель

без уменьшения чувствительности. В основе способа лежит измерение угла между линией отвода и вносимым напряжением датчика. Для выделения вносимого напряжения использованы

(рис. 5.16, *а*) два одинаковых трансформаторных датчика *2* и *3* (измеряющий и компенсирующий, последний расположен внутри прибора), возбуждающие обмотки которых включены согласно, а измерительные — встречно. В режиме холостого хода напряжения на измерительных обмотках равны по амплитуде, но сдвинуты по фазе на угол 180°, т. е. их векторы направлены встречно. Поэтому на выходе датчиков напряжение равно нулю, что аналогично переносу начала координат на плоскости напряжений или сопротивлений в точку $\sigma = 0$ (см. рис. 5.8).

При помещении датчика на деталь на выходе получается вносимое напряжение (рис. 5.16, *б*), активная составляющая которого $u_{вн_R}$ зависит от различных факторов так же, как $R_{вн}$, а индуктивная составляющая $u_{вн_L}$ — как $\omega L_{вн}$ (см. рис. 5.9). Если в детали под датчиком трещины нет, то на выходе возникает напряжение $u_1 = OA$, вектор которого практически совпадает с линией отвода h'. При таком состоянии дефектоскоп настраивают для контроля данной детали. Относительно вектора u_1 (или, что то же самое, относительно линии отвода h') измеряется фаза всех вносимых напряжений. Если датчик переставить на трещину, то вносимое напряжение получит приращение AC и станет равным $u_2 = OC$. Вектор u_2 относительно вектора u_1 не только уменьшился, но и повернулся на угол Ψ.

Для преобразования сигнала датчика использован фазовый различитель *6*, который вырабатывает сигнал, пропорциональный углу между линией отвода и вектором вносимого напряжения и не зависящий от амплитуды последнего. Этот сигнал в дефектоскопе регистрируется стрелочным индикатором. Так как при возникновении зазоров векторы вносимого напряжения практически совпадают с линией отвода, например вектор OD, то из-за колебаний зазора между деталью и датчиком отклонения стрелки не наблюдается. Однако другие мешающие факторы, влияние которых на сигнал датчика изображается криволинейными годографами (см. рис. 5.9, *в, г, е, ж, з*), вызывают показания дефектоскопов, что усложняет проведение контроля и расшифровку его результатов.

В связи с измерением фазы дефектоскопы ДНМ-15 и ДНМ-500 имеют существенные особенности. Для их выяснения рассмотрим годографы приращений вносимого напряжения (рис. 5.17), обусловленных трещинами различных относительных размеров: длины поверхностных трещин $l = \frac{l'}{D_c}$, глубина которых s' больше глубины проникновения ВТ ($s' > y_0$); глубины поверхностных трещин $s = \frac{s'}{D_c}$, длина которых l' значительно больше среднего диаметра датчика D_c ($l' \geqslant 3D_c$), а также глубины залегания подповерхностной трещины $d = \frac{d'}{D_c}$, у которой $l' \geqslant 3D_c$, $s' > y_0$. Начало координат годографов приращений (рис. 5.17) лежит на годо-

графе σ вносимых напряжений (рис. 5.9) и совпадает с точкой, характеризующей влияние электропроводности контролируемой детали на сигнал датчика.

При увеличении глубины или длины трещины приращение вносимого напряжения изменяется от нуля вверх по годографу s или l, что вызывает рост угла Ψ между линией отвода h' и вносимым напряжением, обусловленным трещиной, и рост показаний дефектоскопа.

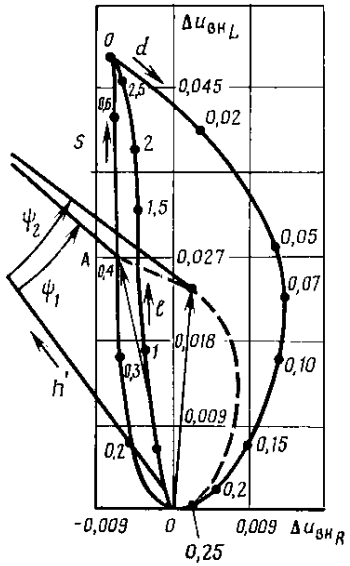


Рис. 5.17. Диаграмма изменений вносимых напряжений датчика в зависимости от размеров трещин и глубины залегания

Если трещину, размеры которой соответствуют, например, точке A на рис. 5.17, «погружать» в металл, то ею обусловленные приращения напряжения будут изменяться по штриховому годографу. Поворот вектора приращения вносимого напряжения вправо от линии отвода приводит к тому, что угол Ψ при «погружении» несплошности до некоторой глубины d не только не уменьшается, но даже растет ($\Psi_2 > \Psi_1$), хотя амплитуда приращения напряжения, вызванного подповерхностной трещиной, меньше, чем амплитуда приращения напряжения, вызванного такой же поверхностной трещиной. Этим объясняется то, что дефектоскопы ДНМ-15 и ДНМ-500 при выявлении подповерхностных несплошностей при небольшой глубине их залегания d' могут давать большие показания, чем при выявлении таких же поверхностных трещин. Дефектоскоп ДНМ-15 можно использовать для выявления несплошностей в элементах конструкции, закрытых металлической обшивкой, например в лонжеронах.

В некоторых случаях вектор приращения напряжения, обусловленного несплошностью, оказывается слева от линии отвода, например при наличии некоторых неглубоких поверхностных дефектов (рис. 5.17). Это значит, что угол Ψ получается отрицательным, а на выходе фазового различителя появляется отрицательное напряжение. Оно должно привести к отклонению стрелки индикатора влево от нуля шкалы. Такие измерения в дефектоскопах типа ДНМ не предусмотрены, и несплошности подобного вида прибором могут быть не обнаружены.

Отрицательный знак угла Ψ получается при наличии трещин на ребрах, кромках лопаток, если датчик, средний диаметр которого больше ширины ребра, кромки, размещать с торца, как

показано на рис. 5.18, *а*. Если датчик поместить так, как показано на рис. 5.18, *б*, то трещины дефектоскопом будут выявлены, так как угол Ψ получится положительным.

На рис. 5.19 в координатах «толщина ребра Δ — электропроводность материала деталей σ» приведена граница, показывающая, при каких сочетаниях σ и Δ в случае правильной настройки дефектоскоп ДНМ-15 перестает выявлять поперечные трещины в узких ребрах, кромках при размещении датчика с торца. Область невыявления расположена ниже и левее границы.

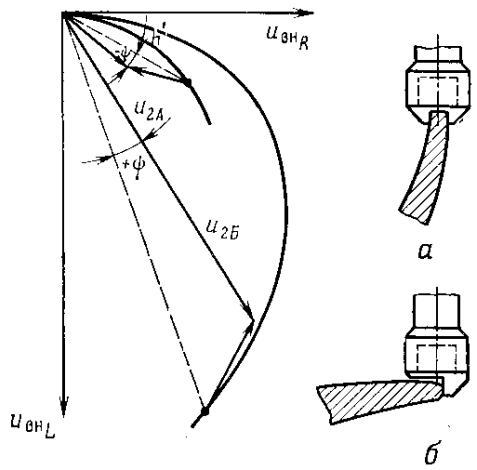


Рис. 5.18. Изменение знака угла, измеряемого дефектоскопами типа ДНМ, в зависимости от положения датчика на кромке (*а* и *б*)

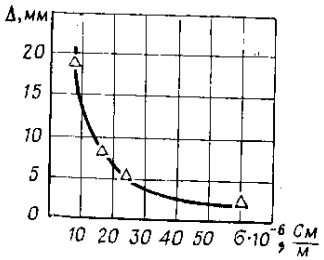


Рис. 5.19. Область невыявления трещин в ребрах и кромках дефектоскопом ДНМ-15

Дефектоскоп ДНМ-15 работает на частоте 15 кГц, позволяет проверять детали из немагнитных сплавов на основе магния, алюминия, меди ($\sigma = 8 \cdot 10^6$ См/м и более). Диаметр датчика 10 мм. При предельно достижимой чувствительности им можно обнаружить трещины длиной 5 мм, глубиной 0,2 мм. Из-за больших размеров датчика практически невозможно контролировать галтели.

Дефектоскоп ДНМ-500 работает на частоте 500 кГц, позволяет проверять детали из немагнитных материалов: титановых сплавов, жаропрочных и аустенитных сталей ($\sigma = 0{,}5 \cdot 10^6 - 2{,}2 \cdot 10^6$ См/м). Диаметр датчика 4 мм. Можно обнаружить трещины длиной 2 мм, глубиной 0,15 мм.

Скорость перемещения датчиков при контроле дефектоскопами ДНМ-15 и ДНМ-500 не более 20 мм/с. Габариты их — 378×268×26 мм; масса — 8 кг. Работают от сети 127/220 В 50 Гц.

§ 5.9. Методика применения токовихревых дефектоскопов

Рассмотрим общие приемы контроля на примере применения дефектоскопа ВДЦ-1М. Перед контролем, а также при переходе к контролю другой по форме зоны данной детали

или детали другого типа, изготовленной из иного материала, при замене датчика дефектоскоп должен быть настроен. Выбранный датчик устанавливают на контрольный образец в бездефектном месте той же зоны, которую надлежит проверять на деталях.

Ручкой НАСТРОЙКА, ориентируясь по отметке на обрамлении электронно-оптического индикатора, выбирают оптимальный режим работы автогенератора. При этом состояние моста не имеет значения, так как оно на режим работы генератора практически не влияет.

Ручкой БАЛАНС создают такую неуравновешенность моста, при которой стрелка микроамперметра отклоняется вправо от нуля шкалы. Затем этой же ручкой уравновешивают мост и (только в случае использования датчиков Д-1, Д-2, Д-4, Д-6) поворачивают дополнительно влево ручку БАЛАНС на одно деление шкалы, расположенной под этой ручкой, отсекая возможные сигналы помех, например вызванные приближением датчика к выступу или к краю, увеличением кривизны вогнутой поверхности. При этом дефектоскоп загрубляется приблизительно на 200 мкА.

После настройки проверяют чувствительность, перемещая датчик на дефект контрольного образца или нажимая кнопку ИСК. ДЕФЕКТ. В этом случае микроамперметр должен показать 300—400 мкА, красные лампочки на панели и на искательной головке должны вспыхнуть и гореть в течение 2—3 с, угол теневого сектора на экране должен увеличиться.

Если показания микроамперметра меньше 300 мкА, дефектоскоп подстраивают ручкой БАЛАНС, после чего проверяют, нет ли влияния отвода или перекоса датчика и др. Прибор ВДЦ-1М готов к применению.

Условием эффективного применения дефектоскопов является правильное разделение каждой детали на зоны контроля, так как во многих случаях контролировать всю поверхность нет необходимости. В пределах каждой зоны не должно быть значительного изменения формы поверхности, толщины детали (если она соизмерима с глубиной проникновения ВТ), изменения расстояния до магнитной детали, если она примыкает к проверяемой детали. Следует выделять зоны: краевую шириной, равной диаметру датчика, галтели перехода одинакового (или близкого) радиуса, участки поверхности двойной, но близкой по значению кривизны, ребра жесткости, пазы одинаковой ширины, участки вокруг отверстий, заклепок, магнитных масс, например запрессованных подшипников, крепежа, а также другие участки, подлежащие контролю. На каждой из перечисленных зон возможно потребуется применять соответствующий ей датчик (рис. 5.20), а при использовании только одного датчика — выполнять подстройку дефектоскопа. Примеры разделения деталей на зоны рассмотрены в § 5.10.

При выборе датчика из числа входящих в комплект дефектоскопа или разработке специального датчика необходимо учитывать как форму и размеры зоны контроля, так и ее доступность. Для фиксирования датчика относительно края, отверстия, на ребре, в пазу следует использовать насадки на датчик или другие приспособления. Для контроля детали, расположенной в малодоступном месте, возможно потребуется разработка специального

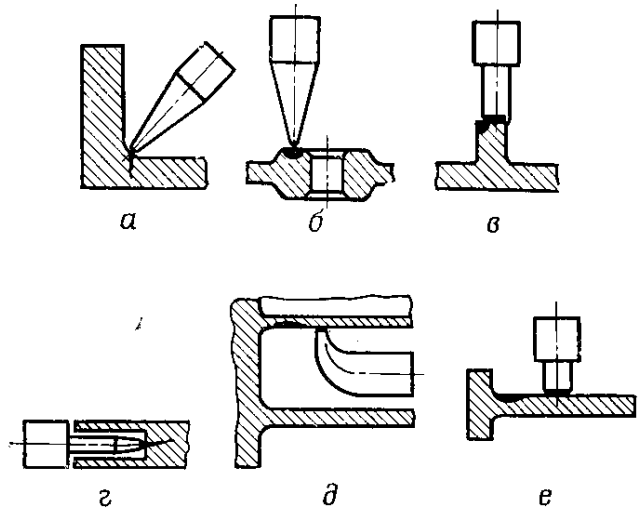


Рис. 5.20. Рабочее положение датчиков (*а, б, в, г, д, е*) при контроле различных зон

приспособления для доставки датчика в зону контроля, фиксирования его положения и перемещения. Особенно тщательно нужно обеспечить постоянство расстояния от датчика до ферромагнитной массы.

Диаметр выбранного датчика должен соответствовать требуемой чувствительности. Минимальная длина трещины, которую может зарегистрировать дефектоскоп при точной настройке, для большинства типов накладных датчиков равна половине диаметра датчика.

В пределах каждой зоны, исходя из направления и размеров, подлежащих выявлению минимальных дефектов, намечают траектории перемещения датчика. Для обнаружения несплошностей длиной менее диаметра датчика последний необходимо сканировать по поверхности контролируемой детали, перемещая его вдоль вероятного направления несплошности с шагом, равным половине диаметра датчика. Для поиска несплошности длиной больше диаметра датчика последний лучше перемещать поперек ее вероятного направления.

Скорость перемещения датчика при применении дефектоскопа ВДЦ-1М не ограничена. Обычно ее выбирают в пределах 5—

300 мм/с. При контроле датчик нужно располагать нормально к поверхности. Изменение зазора между датчиком и деталью должно быть минимальным.

Контроль большого числа однотипных изделий целесообразно проводить поэтапно, проверяя на одном режиме работы дефектоскопа одинаковые зоны на группе деталей.

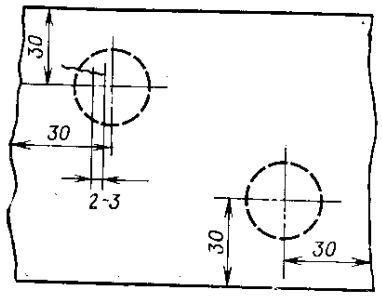


Рис. 5.21. Схема контрольного образца

Для обеспечения высокой надежности контроля стабильность настройки дефектоскопа необходимо проверять по контрольному образцу или с помощью имитатора дефекта периодически во время контроля и обязательно после его окончания. Контрольный образец — это изделие, аналогичное проверяемым, на котором в каждой контролируемой зоне имеются несплошности, близкие по размерам к минимальным дефектам, подлежащим выявлению. Такой контрольный образец можно подобрать из группы изделий, забракованных ранее. Можно в качестве контрольных образцов использовать изделия со значительными несплошностями, но для настройки брать только часть несплошности, которая вызывает показания дефектоскопа, близкие к показаниям при выявлении минимального дефекта. На контрольном образце положения датчика на несплошности должны быть отмечены окружностью или должна быть проведена полоса, по которой следует перемещать датчик. На рис. 5.21 приведена схема контрольного образца для настройки чувствительности дефектоскопа при его работе с датчиками диаметром 23 и 2 мм. Датчик диаметром 23 мм устанавливают на очерченный круг, в который входит вся трещина. Датчик диаметром 2 мм перемещают вблизи конца трещины по отмеченной полосе. Часто минимальные дефекты имитируют надрезами, пропилами, сверлениями и т. д. При отсутствии контрольного образца для проверки настройки, которую выполняют на проверяемой детали в бездефектном месте, следует использовать имитатор дефекта, включаемый нажатием на кнопку ИСК. ДЕФЕКТ.

При обнаружении сигнала индикатора, например при загорании лампочки, необходимо повторить контроль той же зоны, наблюдая за **основным** индикатором — микроамперметром, проверить настройку дефектоскопа и еще раз проконтролировать участок изделия сомнительной сплошности, следя за показаниями микроамперметра. Повторяющиеся устойчивые показания свидетельствуют о наличии несплошности. Наличие несплошности типа трещин сопровождается резким отклонением стрелки микроамперметра.

Показания дефектоскопа могут быть вызваны: трещиной; глубокой (диаметром около 1 мм) забоиной (если контроль проводится датчиком, в торец которого вклеен шарик); пористостью материала; включениями; поражением металла коррозией.

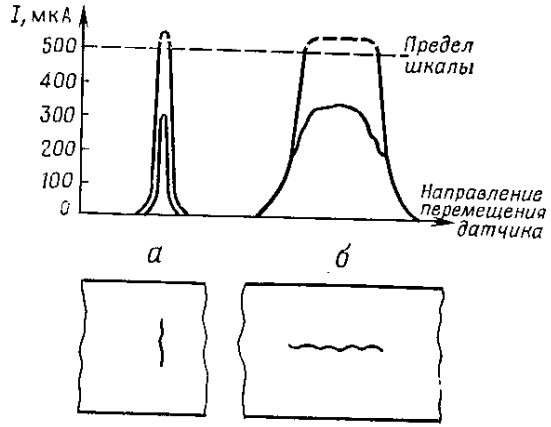


Рис. 5.22. Изменение тока через микроамперметр при обнаружении дефектов:
а — поперечной трещины или забоины; *б* — продольной трещины

Показания микроамперметра при обнаружении трещины зависят от направления перемещения датчика относительно трещины. Если датчик перемещают поперек трещины (рис. 5.22, *а*) или если шарик попадает в глубокую забоину, через микроамперметр проходит короткий импульс тока, проявляющийся в резком перемещении стрелки вправо и назад. Амплитуда импульса зависит от размеров несплошности и чувствительности дефектоскопа. Если датчик перемещают вдоль трещины (рис. 5.22, *б*), возникает длительный импульс тока — в течение времени нахождения датчика над трещиной. При этом могут наблюдаться колебания тока, обусловленные изменением ширины и глубины трещины или изменением положения датчика.

При наличии в контролируемой зоне детали пористости, коррозионного поражения показания микроамперметра будут наблюдаться при перемещении датчика на относительно широких участках поверхности.

С помощью дефектоскопа можно определить протяженность несплошности, которая равна пути перемещения датчика от начала появления сигнала до его исчезновения. Точность повышается с уменьшением диаметра датчика. Она зависит и от настройки дефектоскопа. Показания дефектоскопа как ложные сигналы могут наблюдаться, когда не выдерживается постоянным расстояние от датчика до заклепки, до магнитной детали, при переходе датчика с плоской поверхности на галтель, в паз, при значительном

изменении структуры материала из-за локального наклепа, прижога и т. д.

Обнаруженную дефектоскопом несплошность в случае сомнений можно дополнительно выявить другими методами, например методом цветной или магнитопорошковой дефектоскопии. Однако следует помнить, что токовихревым дефектоскопом можно обнаруживать очень тонкие (шириной раскрытия менее 1 мкм) несплошности, которые методом цветной дефектоскопии могут быть не выявлены.

При контроле деталей авиационной техники методом ВТ специалисты эксплуатирующих подразделений иногда допускают ошибки, снижающие его эффективность. Наиболее общими ошибками являются:

1. Неправильная расшифровка показаний дефектоскопа. Например, в дефектоскопе ВДЦ-1М основным индикатором при расшифровке показаний является микроамперметр, а не красные лампочки, мигание которых привлекает внимание дефектоскописта. Тем не менее некоторые любое мигание лампочек принимают за признак выявленной трещины (если дефектоскоп даже не был предварительно настроен). Любое отклонение стрелки микроамперметра считают признаком выявления трещины, хотя возможны ложные показания, которые наблюдаются при расстройке дефектоскопов и могут вызываться перекосами датчиков. Эти показания не повторяются в точности при повторном контроле.

2. Контроль деталей сложной формы не по зонам при одном режиме настройки дефектоскопа. Например, контроль краевой зоны дефектоскопом, который был настроен при размещении датчика вдали от края, может привести к ложным показаниям. Ложные показания будут наблюдаться также, если без перестройки режима работы перейти от контроля плоского участка к контролю галтели радиусом 2—3 мм или паза.

3. Контроль галтели датчиком, диаметр которого близок к ее радиусу. При этом между датчиком и поверхностью изделия будет значительный зазор, дефект может быть пропущен.

4. Контроль ребер жесткости и кромок детали дефектоскопом типа ДНМ с фазочувствительной измерительной схемой, ширина которых меньше диаметра датчика (при перемещении датчика по торцу). Дефект в ребре или в кромке вызывает отрицательный сигнал, который не будет зарегистрирован индикатором.

5. Контроль стальных деталей со значительной магнитной неоднородностью материала приводит к появлению ложных сигналов, которые часто практически невозможно отличить от сигнала при выявлении несплошности. Стальные детали с неоднородными магнитными свойствами накладными датчиками контролировать не рекомендуется.

6. Контроль изделий, толщина которых близка к глубине проникновения ВТ и в пределах зоны контроля резко изменяется. Это может привести как к появлению ложных сигналов, так и к пропуску дефекта.

7. Случайный (неупорядоченный) характер перемещения датчика в зоне контроля.

8. Применение для проверки настройки дефектоскопа изделий с несплошностями, размеры которых в несколько раз больше минимальных размеров дефектов, подлежащих выявлению.

9. Применение неисправных дефектоскопов.

10. Подключение дефектоскопа без стабилизатора к источнику питания, напряжение которого изменяется в больших пределах.

§ 5.10. Контроль некоторых деталей авиационной техники

Далее приведено несколько примеров контроля деталей дефектоскопом ВДЦ-1М. Аналогичные задачи можно решать, используя дефектоскоп ВД-1ГА.

Контроль лопасти воздушного винта. На лопастях различных типов зоны контроля разные. Рассмотрим контроль лопасти без манжеты, с нагревательным элементом, на которой проверке подлежит поверхность с обеих сторон, за исключением комлевой части и участка под накладкой нагревательного элемента. Поверхность с каждой стороны лопасти, не удаляя покрытия, протирают ветошью, мягким карандашом разделяют на три зоны (рис. 5.23, *а*). Зона *1* — полоса шириной 5 мм вдоль всей задней кромки и части передней кромки до накладки. Зона *2* — полоса шириной 3 мм вдоль накладки. Зона *3* (на рисунке не показана) — внутренние части поверхности. Для удобства зону *3* делят на четыре подзоны *А*, *Б*, *В*, *Г* длиной 300—500 мм, перекрывающие одна другую на 15—20 мм.

Дефектоскопист и дефектоскоп размещаются на стремянке. Проверяемую лопасть ставят горизонтально. К искательной головке ВГ-2 подсоединяют датчик Д-2 (диаметром 2 мм) для контроля зоны *1*. Имитатор дефекта переключают на работу с датчиками Д-1, Д-2, Д-4. После включения и прогрева дефектоскопа датчик устанавливают (рис. 5.23, *б*) в наиболее тонком месте задней кромки. Дефектоскоп настраивают, как указано ранее. Затем датчик смещают в две-три точки наиболее тонкой части зоны *1*. Если при этом режим работы генератора, оцениваемый по электронно-оптическому индикатору, не изменится, значит, во всех точках, где был установлен датчик, несплошностей нет, т. е. настройка выполнена на бездефектном участке. Такой способ настройки по проверяемой детали назовем настройкой по трем точкам. Его используют, когда отсутствует контрольный образец. После настройки проверяют чувствительность дефектоскопа, для чего нажимают на кнопку ИСК. ДЕФЕКТ.

Для проверки зоны *1* датчик перемещают вдоль кромки с одной, а затем с другой стороны лопасти со скоростью

30—50 мм/с. Если индикаторы не показывают наличие дефекта, после окончания контроля зоны *1*, не отнимая от лопасти датчик, с помощью имитатора проверяют настройку дефектоскопа. Она не должна измениться.

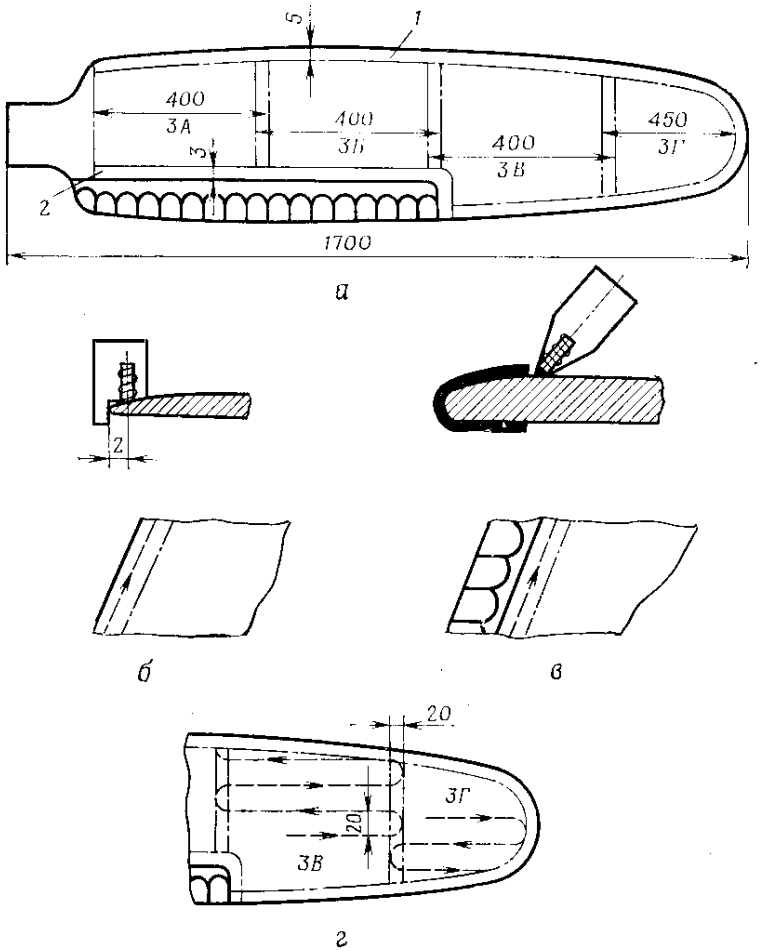


Рис. 5.23. Зоны (*1, 2, 3А—3Г*) контроля на лопасти воздушного винта (*а*), положение и направление перемещения датчиков при их контроле (*б, в, г*)

Чтобы проверить зону *2*, к головке подсоединяют датчик Д-1 (диаметром 2 мм), помещают его на лопасть у накладки, как показано на рис. 5.23, *в*, настраивают дефектоскоп по трем точкам, проверяют чувствительность, как и в зоне *1*. При контроле зоны *2* датчик перемещают со скоростью 30—50 мм/с вдоль накладки,

поджимая его к ней небольшим усилием и выдерживая неизменным его положение. Во избежание ложных показаний, датчик не следует подводить к магнитным лепесткам накладки ближе 5 мм. По окончании контроля зоны *2* имитатором дефекта проверяют чувствительность дефектоскопа. Если настройка изменилась, дефектоскоп настраивают снова и повторяют контроль зоны *2*.

Для контроля зоны *3* к головке подсоединяют датчик Д-5 (диаметром 23 мм), переключают имитатор дефекта на этот датчик, настраивают дефектоскоп по трем точкам. Зону *3* проверяют по подзонам. Датчик перемещают со скоростью 100—300 мм/с с шагом 15—20 мм (рис. 5.23, *г*), переводя его через границу соседних подзон *А, Б, В, Г* на 10—15 мм. К границам с зонами *1* и *2* датчик подводят так, чтобы эти границы были касательными к окружности датчика Д-5. После окончания контроля зоны *3* с обеих сторон лопасти проверяют чувствительность дефектоскопа.

Если при контроле одной из зон вспыхивают лампочки, необходимо более тщательно проверить этот участок, наблюдая за показаниями микроамперметра. Если показания не меняются, проверяют чувствительность дефектоскопа и еще несколько раз повторяют контроль участка. Резкие отклонения стрелки (см. рис. 5.22) свидетельствуют о наличии трещины, плены или неметаллического включения, плавные — соответствуют наличию коррозионных поражений материала. Размеры несплошности, обнаруженной датчиком Д-5, могут быть уточнены путем локального контроля датчиком Д-1. После его подсоединения необходимо переключить имитатор и настроить дефектоскоп.

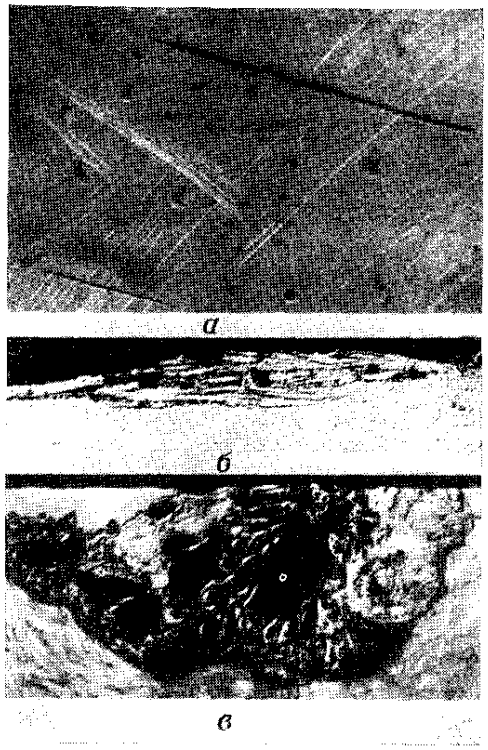


Рис. 5.24. Дефекты лопастей, выявленные дефектоскопом ВДЦ-1М:

а — усталостные трещины (после удаления покрытия проявлены методом цветной дефектоскопии); *б* — поражения межкристаллитной коррозией; *в* — шлаковая раковина (*б, в* — вид на микрошлифе)

На рис. 5.24 приведены дефекты, обнаруженные при контроле лопастей воздушных винтов дефектоскопом ВДЦ-1М.

Контроль авиационных колес. Контроль колес в эксплуатации совмещают с работами по замене покрышек. На колесах проверяют большое число разнообразных зон: галтели перехода от бурта к конической или цилиндрической части несъемной и съемной реборд, участки шириной 40—20 мм, примыкающие к галтелям, галтели упорного буртика, пазы под стопорные кольца, канавки под уплотнительные кольца, выемку под ниппель, участки вокруг винтов, галтели ступицы и др. Для каждого типа колеса выделяют свои зоны контроля.

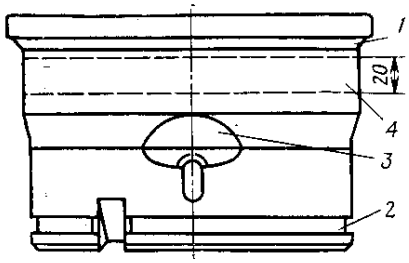


Рис. 5.25. Зоны *1, 2, 3* и *4* контроля на барабане авиационного колеса

Рассмотрим последовательность проверки барабана (рис. 5.25) с четырьмя зонами. Контроль проводят после демонтажа пневматика и удаления бензином с поверхности зон *1, 2, 3, 4* пригоревшей резины, отслоившегося на отдельных участках лакокрасочного покрытия, грязи.

Подсоединив датчик Д-1 (или Д-4), настраивают дефектоскоп, так же как и при контроле лопасти, по трем бездефектным точкам галтели (зона *1*). Ее контроль выполняют перемещением датчика вдоль бурта со скоростью 30—50 мм/с, выдерживая его в одном положении — под углом 40—50° к бурту. При переходе к контролю паза (зона *2*) дефектоскоп перестраивают; во время контроля выдерживают нормальное положение датчика Д-1 относительно поверхности дна паза. Участок у отверстия под ниппель (зона *3*) проверяют после перестройки дефектоскопа, перемещая датчик Д-1 вдоль оси колеса с шагом 4—5 мм. Если в зоне контроля есть магнитная деталь, например шпонка, винт, датчик дефектоскопа до нее не доводят на расстояние 5 мм, чтобы не получить ложных показаний.

После окончания контроля зон *1, 2, 3* (контроль каждой зоны оканчивают проверкой чувствительности) подключают искательную головку ВГ-3, переключают имитатор дефекта, настраивают дефектоскоп, размещая головку в трех точках зоны *4*. Затем проверяют ее, перемещая головку со скоростью 30—50 мм/с и поджимая к бурту. Расшифровывают показания так же, как и в случае контроля лопасти.

На рис. 5.26 приведены дефекты авиационных колес, обнаруженные при контроле дефектоскопом ВДЦ-1М.

Как показал опыт одного из ремонтных предприятий, внедрение метода ВТ (вместо люминесцентного) привело к тому, что на самолетах, отремонтированных этим предприятием, налет на один отказ колеса увеличился в 4 раза.

Контроль рабочих лопаток турбин. Входящая в комплект дефектоскопа ВДЦ-1М головка ВГ-1 (см. рис. 5.11) позволяет проверять в эксплуатации выходные кромки лопаток только последней ступени турбины при наличии к ним доступа.

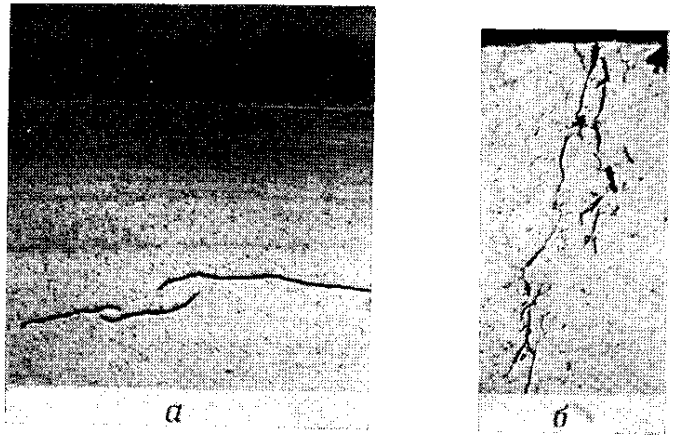


Рис. 5.26. Дефекты авиационных колес, выявленные дефектоскопом ВДЦ-1М:

а — трещины (после удаления покрытия проявлены методом цветной дефектоскопии); *б* — поражения межкристаллитной коррозией (вид на микрошлифе)

Если имеется контрольный образец лопатки того же типа со сквозным надрезом выходной кромки глубиной 1—1,2 мм или такой же трещиной, как у дефектной лопатки, то дефектоскоп настраивают по контрольному образцу. Такая настройка более точна, чем настройка по трем точкам. Если толщина кромки значительно меняется, становясь соизмеримой с глубиной проникновения ВТ, то кромку делят на две зоны. Если изменения толщины незначительны в пределах зоны контроля, то настройку генератора и уравновешивание моста выполняют при размещении датчика в месте, где кромка имеет наименьшую толщину.

Головку ВГ-1 помещают на кромку так, чтобы датчик был перпендикулярным к поверхности (рис. 5.27, *а*). На правильное положение датчика укажет свечение зеленых лампочек. После уравновешивания моста ручку БАЛАНС не смещают с целью загрубления сразу на одно деление, а поступают так. Наклоняют датчик относительно нормального положения на 10—20° (до положения погасания зеленых лампочек) в сторону спинки, а затем корыта и ручкой БАЛАНС компенсируют максимальные отклонения стрелки. Этим устраняют влияние возможных перекосов датчика. После настройки дефектоскопа проверяют его чувствитель-

ность перемещением головки ВГ-1 вдоль кромки через надрез дважды: при перекосе датчика (до положения погасания зеленых лампочек) в сторону корыта и в сторону спинки. В обоих случаях в момент перехода датчика через надрез должны вспыхнуть и го-

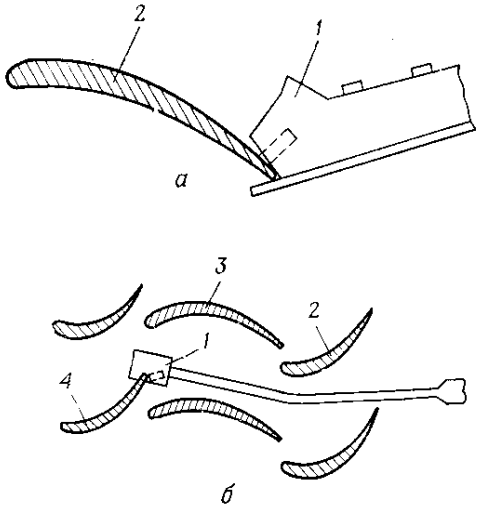


Рис. 5.27. Положение искательных головок при контроле:

а — выходной кромки лопатки последней ступени турбины; *б* — выходной кромки лопатки, расположенной в труднодоступном месте турбины; *1* — искательная головка; *2* — рабочая лопатка последней ступени турбины; *3* — лопатка соплового аппарата; *4* — рабочая лопатка I ступени турбины

реть в течение 2—3 с красные лампочки, а микроамперметр должен показать не менее 300 мкА. При контроле лопаток головку ВГ-1 перемещают со скоростью 5—20 мм/с, поджимая небольшим усилием к кромке, так чтобы зеленые лампочки постоянно горели. При загорании красных лампочек контроль лопатки повторяют, наблюдая за микроамперметром. Затем проверяют настройку прибора по контрольному образцу и контроль повторяют еще несколько раз. Расшифровка результатов не отличается от расшифровки результатов в других случаях.

При разработке головки другой специальной конструкции или механизма дефектоскоп ВДЦ-1М можно применять для контроля проточной части лопаток, расположенных в труднодоступных местах турбины (рис. 5.27, *б*).

Контроль отверстий. Выявление несплошностей, возникающих на поверхности отверстий диаметром 5—30 мм болтовых и заклепочных соединений, является задачей, которая эффективно может быть решена в ряде случаев только методом ВТ, так как несплошность на поверхность, доступную для прямого наблюдения, может не выходить (рис. 5.28, *а, б*). Для контроля отверстий болты выворачивают, заклепки извлекают так, чтобы не повредить соединенные детали. Поверхность отверстия протирают ветошью, смоченной в бензине, удаляют заусенцы. Используют специальную головку, не входящую в комплект дефектоскопа. Она состоит (рис. 5.28, *в*) из датчика *1*, соединенного плоской пружиной *2*

с корпусом *3*, и ограничительного кольца *4*, которое можно устанавливать на различном расстоянии от датчика. Диаметр корпуса головки равен диаметру проверяемого отверстия. Положение датчика в зоне контроля фиксируют частью корпуса, вставляемой в отверстие, и ограничительным кольцом, поджимаемым к плоской

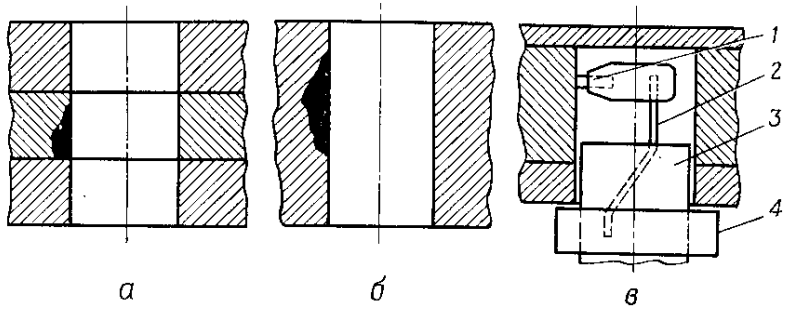


Рис. 5.28. Возможные места возникновения несплошности на поверхности отверстия (*а, б*) и положение искательной головки при контроле (*в*):

1 — датчик; *2* — плоская пружина; *3* — корпус; *4* — ограничительное кольцо

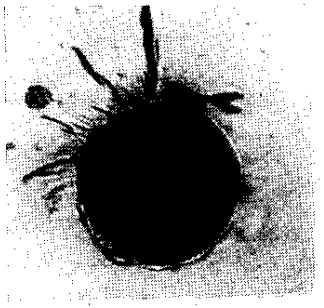
поверхности. К проверяемой зоне датчик поджимается пружиной. В отверстии выделяют краевую зону шириной 3 мм, зону стыка соединяемых деталей шириной 3 мм и внутреннюю зону. Дефектоскоп настраивают в каждой зоне. Для проверки отверстия головку поворачивают вокруг оси, следя за индикаторами дефектоскопа. Если отверстие глубокое (более 10 мм), то внутреннюю зону проверяют несколькими проходами датчика с шагом 3 мм.

Методом ВТ проверяют отверстия диаметром 6 мм в стрингерном наборе центроплана, а также диаметром 12 и 18 мм в узлах подвески шасси и фитингах.

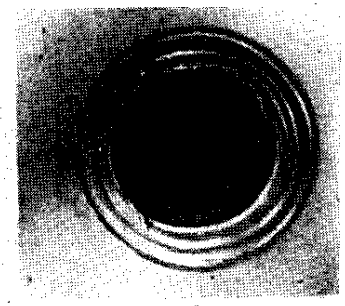
Контроль заклепочных швов обшивки. Такие швы выполняют заклепками с потайными головками. Для выявления трещин длиной 2—3 мм датчик Д-1 размещают на контуре головки заклепки в бездефектном месте, настраивают дефектоскоп, загрубляя его на 1—1,5 деления, проверяют чувствительность с помощью имитатора (отклонение стрелки при включении кнопки ИСК. ДЕФЕКТ. должно быть не более 400 мкА). Затем датчиком, как карандашом, описывают контур каждой заклепки. При таком контроле в обшивке толщиной 1 мм (рис. 5.29, *в*) можно обнаружить даже трещины, развившиеся с внутренней поверхности и не вышедшие на открытую часть наружной ее части (рис. 5.29, *а, б*).

Контроль мембран сигнально-предохранительного устройства (СПУ) огнетушителей. Задача состоит не в выявлении несплошности, а в определении, из какого материала изготовлена мембрана, поставленная в СПУ: из бронзы БрОФ-6,5-0,15 ($\sigma=9{,}8\cdot10^6$ См/м) или из стали 12Х18Н10Т ($\sigma=2\cdot10^6$ См/м). Нормальную работу обеспечивает бронзовая мембрана. Обе

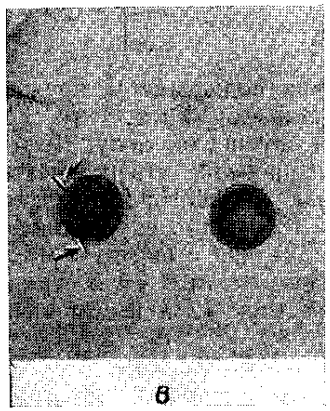
мембраны имеют одинаковые толщину и диаметр, но отличаются цветом; стальная выдерживает значительно большее давление, из-за чего при повышении температуры баллон может взорваться. Стальные мембраны могут быть поставлены в некоторые СПУ



а



б



в

Рис. 5.29. Трещины в обшивке стабилизатора, выявленные дефектоскопом ВДЦ-1М:

а — трещины вокруг отверстия (заклепка извлечена, вид с внутренней стороны обшивки); *б* — трещины вокруг отверстия на поверхности раззенковки, скрытые при наличии заклепки ее головкой (трещины проявлены методом цветной дефектоскопии); *в* — трещина вышла на наружную поверхность обшивки

ошибочно при перезарядке огнетушителей, так как и они входят в состав запасных частей, но предназначены для использования в другом узле огнетушителя.

Подход к мембране в конструкции возможен через канал в штуцере длиной 40 мм диаметром 3,6 мм в верхней части и 7 мм в нижней (рис. 5.30). Для контроля используют датчик Д-7 длиной 45 мм, поставляемый отдельно от дефектоскопа ВДЦ-1М.

Так как проверяемая мембрана окружена ферромагнитным штуцером, а разница в электропроводности материалов большая, имеются особенности в настройке дефектоскопа. Ее выполняют по бронзовой и стальной мембранам, помещенным на неметаллическое основание. Датчик, соединенный проводниками с головкой ВГ-2, помещают на бронзовую мембрану. Генератор настраивают

так, чтобы угол теневого сектора на экране индикатора равнялся всего 5—10°. Затем уравновешивают мост и загрубляют дефектоскоп поворотом ручки БАЛАНС на три — четыре деления. При перестановке датчика на стальную мембрану угол теневого сектора должен увеличиться до 80—100°, стрелка должна резко отклониться на всю шкалу.

При контроле датчик медленно вводят в канал штуцера. Пока катушка индуктивности перемещается в узком канале (диаметром 3,6 мм), стрелка отклоняется на всю катушку. Вывод о характере материала, из которого выполнена мембрана, делают, когда датчик установлен на мембрану, а рука дефектоскописта отведена. Отклонение стрелки вправо на всю шкалу указывает на то, что мембрана стальная. Если стрелка находится на нуле, мембрана бронзовая. Альтернативой такого контроля мембран может быть только визуальный осмотр, для которого потребовалось бы стравливать противопожарную жидкость, разбирать СПУ. Демонтажно-монтажные и заправочные работы на одном огнетушителе выполняют в течение трех суток. Контроль мембран методом ВТ занимает не более 10 мин.

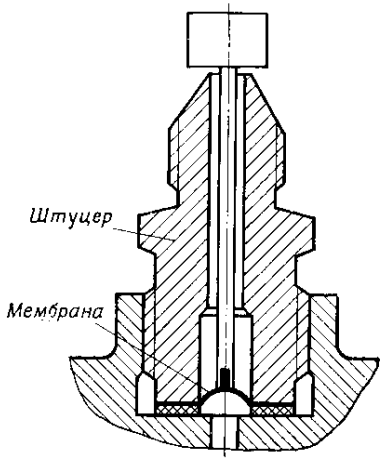


Рис. 5.30. Положение датчика при контроле мембран

Глава 6

АКУСТИЧЕСКАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

§ 6.1. Области применения акустических методов при эксплуатации авиационной техники

Из известных акустических (ультразвуковых и звуковых) методов контроля деталей (ГОСТ 18353—73) в аэродромных условиях при эксплуатации авиационной техники широко применяют эхо-импульсный и импедансный методы. В отдельных случаях используют теневой или зеркально-теневой метод. Перспективными являются методы акустической эмиссии и шумовибрационный.

Эхо-импульсный метод применяют для обнаружения трещин усталости на деталях и узлах, расположенных в труднодоступных местах конструкции, выявления внутренних дефектов в сварных швах силовых узлов, в материале кожухов камер сгорания и др.

Импедансный метод применяют для контроля клеевых соединений в конструкциях с сотовым наполнителем.

Ультразвуковой метод в ряде случаев оказался единственно возможным для эффективного решения сложных задач дефектоскопического контроля деталей непосредственно на самолетах.

Для успешного применения эхо-импульсного метода необходимы следующие условия:

— наличие доступа на самолете для ввода ультразвука в контролируемую зону детали;

— материал детали должен обладать упругими свойствами, быть однородным, с малым коэффициентом затухания;

— чистота обработки поверхности детали должна быть не менее ▽ 5 независимо от наличия лакокрасочного покрытия (последнее при контроле не удаляется);

— радиусы скруглений и галтелей в зонах, контролируемых поверхностными волнами, должны быть не менее $2\lambda_{пов}$, где $\lambda_{пов}$ — длина поверхностной волны.

§ 6.2. Природа и свойства акустических волн

Акустическими волнами называют распространяющиеся в упругой среде механические колебания частичек среды. При движении волны частицы не переносятся, а

совершают колебания около своих положений равновесия. Расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе, называется длиной волны λ:

$$\lambda = cT = \frac{c}{f},$$

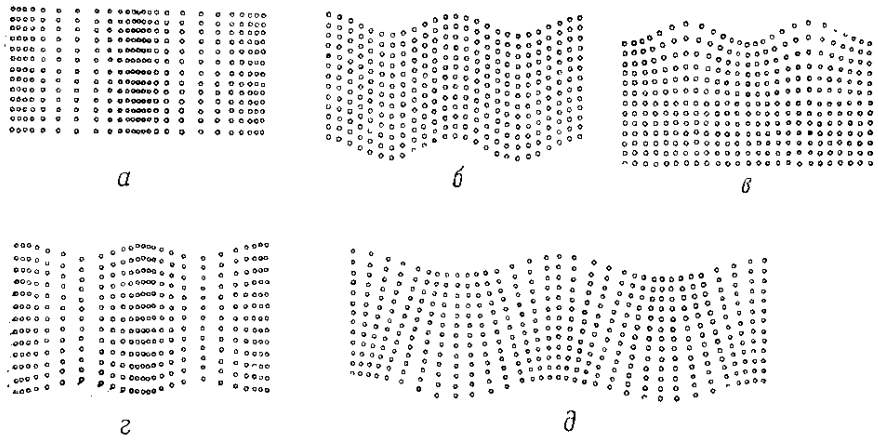


Рис. 6.1. Упругие волны, распространяющиеся в твердой среде:
а — продольные; *б* — поперечные; *в* — поверхностные; *г* — симметричные нормальные волны (волны растяжения); *д* — асимметричные нормальные волны (волны изгиба)

где c — скорость движения волны в материале проверяемой детали, м/с;

T — период колебаний, с;

$f = \frac{1}{T}$ — частота колебаний, Гц.

В зависимости от направления колебания частиц по отношению к направлению распространения волны различают продольные, поперечные, поверхностные и нормальные волны.

В продольной волне частицы колеблются вдоль направления распространения волны, а в поперечной (сдвиговой) волне — перпендикулярно к направлению ее распространения. Продольные волны представляют собой чередование зон сжатий и растяжений (рис. 6.1, *а*). Они могут распространяться в твердых, жидких и газообразных средах. Поперечные волны (рис. 6.1, *б*) могут распространяться только в твердых средах.

В поверхностной волне частицы одновременно совершают продольные колебания в направлении распространения и поперечные перпендикулярно к поверхности, описывая эллиптические или более сложные траектории. Эти волны распространяются

по поверхности детали, следуя ее изгибам и быстро затухая с глубиной (рис. 6.1, *в*). Толщина околоповерхностного слоя, в котором распространяются поверхностные волны, составляет не более $2\lambda_{пов}$. При рабочих частотах 0,5—10 МГц примерные значения этих толщин соответственно составляют 6,0—0,3 мм.

Нормальные волны можно возбудить только в тонкостенных (от 0,3 до 10 мм) листах, трубах или в оболочках постоянной толщины. При этом частицы совершают колебания по таким же траекториям, как в поверхностной волне, но на всю толщину листов или стенок труб, оболочек. Обычно возникают и распространяются независимо одна от другой две нормальные волны (рис. 6.1, *г* и *д*): симметричная (волна растяжения) и асимметричная (волна изгиба).

В зависимости от частоты упругие волны разделяют на инфразвуковые (f до 16—20 Гц), звуковые (от 16 до $2 \cdot 10^4$ Гц), ультразвуковые (от $2 \cdot 10^4$ до 10^9 Гц) и гиперзвуковые — свыше 10^9 Гц. Восприятию человеческим ухом доступен только звуковой диапазон, остальные волны не слышны. Для целей дефектоскопического контроля используют ультразвуковые волны частотой от 0,5 до 10 МГц и волны звукового диапазона частотой от 1 до 8 кГц.

Скорость распространения продольной $c_{пр}$, поперечной $c_{поп}$ и поверхностной $c_{пов}$ волн определяется только их типом, упругими свойствами (модулями упругости и сдвига, коэффициентом Пуассона) и плотностью материала детали. Между собой эти скорости связаны соотношениями $c_{пов} \simeq 0{,}93\ c_{поп}$; $c_{поп} \simeq 0{,}6\ c_{пр}$. Скорость распространения нормальной волны $c_н$ в отличие от скорости распространения других типов волн зависит не только от свойств материала, но и от частоты колебаний и толщины стенок контролируемых изделий.

Акустические свойства одной среды по отношению к другой характеризуются **удельным волновым сопротивлением** z, под которым понимают произведение плотности среды ρ на скорость распространения в ней продольной волны $c_{пр}$ ($z = \rho c_{пр}$). Для газов, жидкостей и металлов z относятся между собой примерно как 1:10 000:100 000. Соотношение удельных волновых сопротивлений двух сред определяет степень проникновения ультразвуковой энергии из одной среды в другую.

Значения скоростей $c_{пр}$, $c_{поп}$ и $c_{пов}$, длин волн $\lambda_{пр}$, $\lambda_{поп}$ и $\lambda_{пов}$ и удельного волнового сопротивления некоторых веществ приведены в табл. 14.

Коротковолновые ультразвуковые колебания (УЗК) по своим свойствам сходны со свойствами световых лучей: распространяются в виде направленных лучей; они так же, как и световые лучи, могут отражаться, преломляться, фокусироваться, интерферировать, испытывать дифракцию и затухать по мере распространения.

Таблица 14

Скорость распространения, длина продольных, поперечных и поверхностных ультразвуковых волн и удельное волновое сопротивление некоторых веществ

Вещество	Плотность $\rho \cdot 10^3$, кг/м³	Скорость ультразвука ($c_{пр} \cdot 10^3$), м/с			Длина волны при частоте 2,5 МГц, мм			Удельное волновое сопротивление $z \cdot 10^6$ для продольных волн, кг/м²·с
		$c_{пр}$	$c_{поп}$	$c_{пов}$	$\lambda_{пр}$	$\lambda_{поп}$	$\lambda_{пов}$	
Алюминий	2,70	6,26	3,08	2,8	2,5	1,23	1,12	16,9
Сталь 45	7,8	5,85	3,23	3,0	2,32	1,29	1,20	45,6
Сталь ХН77ТЮР	8,2	6,08	3,3	3,07	2,43	1,32	1,23	49,8
Бронза	8,5—8,9	3,50—3,8	2,30—2,5	2,1—2,3	1,41—1,52	0,93—1,0	0,87—0,92	29,8—33,8
Латунь Л-68	8,44	4,44	2,12	1,97	1,77	0,81	0,79	37,5
Титан	4,5	6,0	3,5	3,25	2,5	1,4	1,3	27,0
Органическое стекло	1,18	2,67	1,12	1,05	1,07	0,44	0,42	4,8
Резина вулканизированная	0,95—1,6	1,50—2,3	—	—	—	—	—	1,3—3,7
Текстолит	1,28	2,9	—	—	—	—	—	3,7
Эпоксидная смола ЭД-5	1,1	2,6	—	—	—	—	—	2,86
Вода	1,0	1,5	—	—	—	—	—	1,5
Масло трансформаторное	0,9—0,92	1,38—1,4	—	—	—	—	—	1,23—1,27
Воздух	$1{,}29 \cdot 10^{-3}$	0,331	—	—	—	—	—	$4{,}2 \cdot 10^{-4}$

§ 6.3. Источники возбуждения ультразвуковых волн

Для возбуждения ультразвуковых волн используют электроакустические преобразователи: пьезоэлектрические, магнитострикционные и др. В акустических дефектоскопах применяют пьезоэлектрические преобразователи из пьезокерамических материалов — цирконата титаната свинца ЦТС-19 и титаната бария ТБ-1 (ГОСТ 13927—68). Действие их основано на пьезоэлектрическом эффекте, который заключается в том, что при сжатии и растяжении преобразователей на их поверхностях возникают электрические заряды (рис. 6.2), знак которых определяется видом деформации (сжатие или растяжение), а величина — приложенной силой. Пьезоэффект обратим: если приложить к поверхностям преобразователя переменное электрическое напряжение, то преобразователь будет совершать механические колебания (сжиматься и растягиваться) с частотой приложенного напряжения. Таким образом, пьезоэлектрический преобразователь позволяет преобразовывать электрические колебания в ультразвуковые и, наоборот, ультразвуковые в электрические.

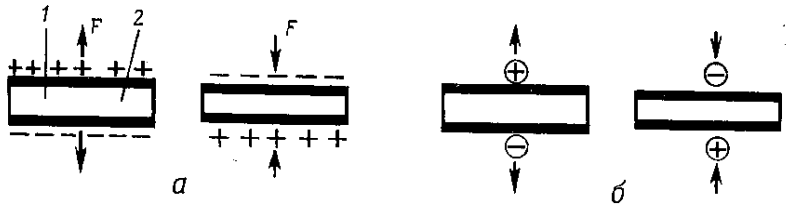


Рис. 6.2. Прямой (*а*) и обратный (*б*) пьезоэлектрический эффект: *1* — пьезопластина; *2* — слой серебра; *F* — сила сжатия или растяжения

Пьезопреобразователи изготовляют в форме пластины, цилиндра и т. д. На обе их поверхности наносят тонкий слой серебра. Эксплуатационный интервал температур для пластин из ТБ-1 составляет от —60 до +60°С, а для пластин из ЦТС-19 — от —60 до +250°С. При нагреве титаната бария ТБ-1 свыше 60°С, а цирконата титаната свинца ЦТС-19 свыше 250°С они начинают терять свои пьезоэлектрические свойства.

Наибольшую мощность УЗК пьезопластина излучает при резонансе, т. е. когда частота ее собственных механических колебаний совпадает с частотой возбуждающего напряжения:

$$f_{рез} = \frac{c_{пр}}{2d},$$

где $c_{пр}$ — скорость продольных ультразвуковых волн в материале пьезопластины;

d — толщина пьезопластины.

Чем больше толщина пьезопластины, тем меньше ее резонансная частота. Пластина из ЦТС-19 толщиной 0,7—0,75 мм имеет $f_{рез} = 2{,}5$ МГц. Пластина из ТБ-1 колеблется с этой частотой в резонансном режиме при толщине 1 мм.

Если излучающую пьезопластину приложить к поверхности детали, то УЗК будут возбуждаться в материале детали и распространяться в нем. В зависимости от режима работы генератора электрического напряжения УЗК можно излучать в контролируемую деталь непрерывно или в виде высокочастотных импульсов заданной длительности. Импульсы УЗК, излучаемые в материал детали, называют з о н д и р у ю щ и м и и м п у л ь с а м и.

Пьезопластина после прекращения действия на нее напряжения продолжает совершать затухающие механические колебания. Для ускорения затухания этих колебаний пьезопластину демпфируют. В качестве демпфера, к которому прикленвают или поджимают пластину, используют материалы, сильно поглощающие УЗК (эпоксидную смолу с наполнителем, асбест, резину и т. д.). Такое демпфирование позволяет уменьшить длительность зондирующего импульса и приблизить его к длительности импульса электрического напряжения.

Для ввода ультразвуковых волн в материал контролируемых деталей и приема отраженных эхо-сигналов, а также для предохранения пьезопластины от повреждений и износа ее вместе с демпфером помещают в устройства, называемые искателями (или искательными головками).

Для возбуждения в детали волн различного типа используют свойства отражения, преломления и трансформации УЗК на границе раздела двух сред.

Если продольная волна падает на деталь по нормали к ее поверхности (рис. 6.3, *а*), то часть энергии УЗК проходит в металл и распространяется в нем также в направлении нормали, а часть отражается. При этом проходящая и отраженная волны имеют тот же тип, что и падающая, т. е. являются продольными. Доля отраженной энергии тем больше, чем больше разница акустических сопротивлений контактирующих материалов — пьезопластины и контролируемой детали. При наличии между пьезопластиной и поверхностью детали воздушного зазора (из-за шероховатости поверхностей или перекоса искателя) от зазора отразится обратно в тело искателя вся энергия УЗК, так как удельные акустические сопротивления этих сред значительно отличаются одно от другого. Для улучшения акустического контакта на поверхность детали в месте установки искателя наносят тонкий слой минерального масла (контактная смазка), которое заполняет впадины шероховатостей поверхности, устраняя тем самым воздушный зазор. Таким путем удается ввести в металл около 10—12% падающей на него энергии УЗК.

Если продольная волна, излучаемая пьезопластиной, падает под углом β к поверхности детали (для чего между пьезопласти-

ной и деталью располагают призму из органического стекла с углом наклона β), то на границе раздела призма — деталь происходят три процесса: отражение, преломление и трансформация УЗК, т. е. расщепление падающей продольной волны на две отра-

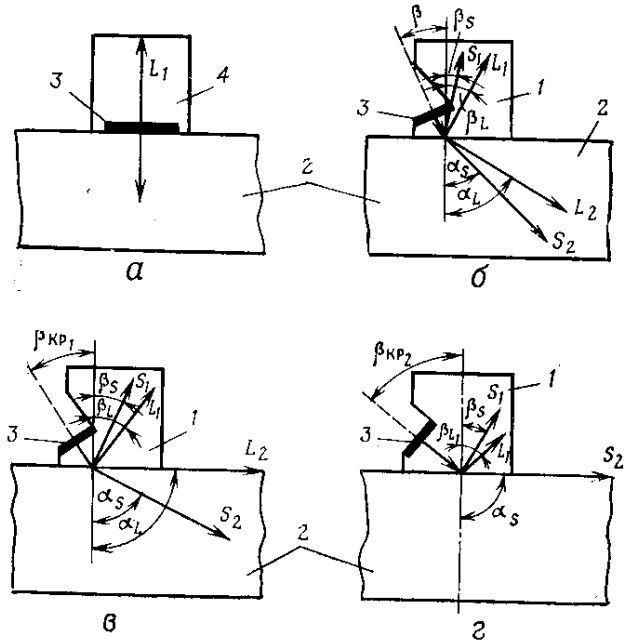


Рис. 6.3. Схемы отражения, преломления и преобразования продольных волн:

а — угол падения 90°; *б* — угол падения меньше $\beta_{кр_1}$; *в* — угол падения равен $\beta_{кр_1}$; *г* — угол падения равен $\beta_{кр_2}$; *1* — призма; *2* — деталь; *3* — пьезопластина; *4* — демпфер

женные (поперечную S_1 и продольную L_1) и две преломленные (поперечную S_2 и продольную L_2), распространяющиеся соответственно под углами отражения β_s, β_L и преломления α_s, α_L (рис. 6.3, *б*). Углы α_L и α_s обычно называют **углами ввода** УЗК.

Углы падения, отражения и ввода УЗК связаны с их скоростями соотношениями синусов:

$$\frac{\sin\beta}{c_{пр_1}} = \frac{\sin\beta_s}{c_{поп_1}} = \frac{\sin\alpha_L}{c_{пр_2}} = \frac{\sin\alpha_s}{c_{поп_2}} = \frac{\sin\beta_L}{c_{пр_1}},$$

где $c_{пр_1}$, $c_{поп_1}$ и $c_{пр_2}$, $c_{поп_2}$ — скорости продольной и поперечной волн в материалах призмы *1* и детали *2*.

Из соотношения синусов следует, что $\beta = \beta_L$, т. е. угол падения равен углу отражения продольной волны.

При увеличении угла падения β наступает момент, когда преломленная продольная волна L_2 скользит вдоль поверхности

детали, а внутри материала распространяется только поперечная волна S_2 ($\alpha_L = 90°$, рис. 6.3, *в*). Такой угол β называют **первым критическим углом** ($\beta_{кр_1}$). При некотором значении угла падения $\beta > \beta_{кр_1}$ (рис. 6.3, *г*) вдоль поверхности детали скользит только поперечная волна S_2 ($\alpha_s = 90°$). Такой угол β называют **вторым критическим углом** ($\beta_{кр_2}$). Если $\beta > \beta_{кр_2}$, то в деталь УЗК не проникают.

При конструировании искателей угол падения выбирают таким, чтобы в контролируемом материале распространялся преимущественно один тип волны (варианты *а*, *в* и *г* на рис. 6.3).

Амплитуда поверхностной волны сильно зависит от угла падения. Оптимальное значение $\beta = \beta_{пов}$, при котором возбуждаются поверхностные волны максимальной амплитуды, определяют из равенства:

$$\sin\beta_{пов} = \frac{c_{пр_1}}{c_{пов}}.$$

Например, для материала лопаток турбин этот угол $\beta_{пов} = 65°$.

При падении волны под некоторым углом $\beta_{норм}$ к поверхности листа (к стенке кожуха камеры сгорания или цилиндра, трубопровода и др.) в материале возбуждаются симметричная и асимметричная нормальные волны. Для материала, например, кожуха (Ст. 20 толщиной 2 мм) угол $\beta_{норм} = 59°$. Практически $\beta_{норм}$ определяют экспериментально или по графикам зависимости скорости нормальных волн от их частоты и толщины детали.

§ 6.4. Распространение ультразвуковых волн

Ультразвуковое поле, создаваемое пьезопластиной диаметром D в окружающей среде, имеет вблизи излучателя (рис. 6.4) цилиндрическую форму (ближняя зона), а далее начиная с расстояния $l_б$ — форму усеченного конуса с углом 2Θ при вершине (дальняя зона). Протяженность ближней зоны

$$l_б = \frac{r^2}{\lambda} = \frac{r^2 f}{c},$$

где r — радиус пьезопластины;

f — частота УЗК;

c — скорость волны в проверяемом материале.

В дальней зоне ультразвуковые волны (продольные, поперечные и поверхностные) расходятся. Половину угла 2Θ называют **углом расхождения волны**

$$\Theta = \arcsin 1{,}22\frac{c}{Df} = 0{,}61\frac{\lambda}{r}.$$

Так, при $f = 2{,}5$ МГц и $D = 12$ мм Θ не превышает 14°. Чем больше частота УЗК и диаметр пьезопластины, тем меньше Θ, т. е. ультразвуковое поле высокочастотных УЗК характеризуется

высокой направленностью. Поэтому такую волну называют **лучом**.

Для дефектоскопии важное значение имеет интенсивность (сила) ультразвукового поля. Под интенсивностью ультразвука понимают количество энергии, переносимой ультразвуковой волной за 1 с через площадку в 1 м^2, расположенную перпендику-

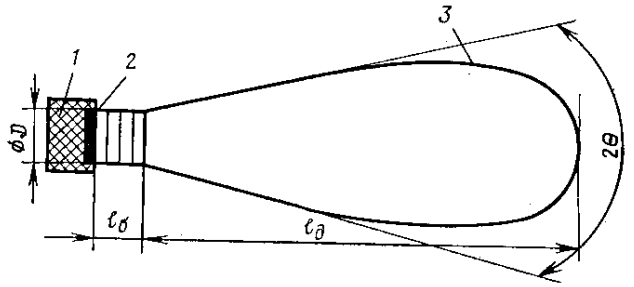


Рис. 6.4. Схема распространения ультразвуковых волн в ближней и дальней зонах объемного тела:
1 — демпфер; *2* — пьезопластина; *3* — ультразвуковая волна

лярно к направлению распространения волны. На практике интенсивность измеряют в относительных единицах — децибелах (дБ):

$$N = 10 \lg \frac{J}{J_0} = 20 \lg \frac{A}{A_0},$$

где J и J_0 — интенсивности двух сравниваемых ультразвуковых волн;

A и A_0 — их амплитуды.

В дальней зоне интенсивность ультразвукового поля с удалением от излучателя монотонно уменьшается (из-за расхождения волны и потери ею энергии на смещение частиц среды). Уменьшение интенсивности зависит не только от свойств среды и угла Θ, но и типа волны. Интенсивность продольной и поперечной волн убывает с расстоянием быстрее, чем интенсивность поверхностной и нормальной волн, так как последние концентрируются в ограниченном слое. Поэтому поверхностная и нормальная волны могут распространяться в одних и тех же материалах на бо́льшие расстояния, чем продольная и поперечная.

Ультразвуковое поле искателя изображают в виде диаграммы направленности, характеризующей изменение поля в зависимости от угла между направлением луча и акустической осью (перпендикуляром излучающей поверхности нормального искателя, восстановленного в геометрическом центре пьезопластины). За единицу принимают амплитуду поля на оси искателя. Номограмма направленности искателя показана на рис. 6.4. Она тем уже, чем выше частота УЗК, больше диаметр излучателя и чем меньше угол падения.

Затухание ультразвуковых волн. Плоская ультразвуковая волна, распространяющаяся в материале детали, теряет свою энергию по экспоненциальному закону:

$$J_l = J_0 e^{-2\delta l}; \quad A_l = A_0 e^{-2\delta l},$$

где J_0, A_0, и J_l, A_l — интенсивности и амплитуды ультразвуковой волны в точке ввода ее в деталь и на расстоянии l от этой точки;

δ — коэффициент затухания ультразвука; он определяется расстоянием (длиной пути) в метрах, на котором амплитуда плоской волны уменьшается в $e = 2{,}718$ раза.

Иногда затухание характеризуют числом отрицательных децибел N_δ, на которое уменьшается амплитуда сигнала на отрезке пути 1 м:

$$N_\delta = 8{,}686\,\delta.$$

Энергия волны уменьшается вследствие поглощения (перехода ультразвуковой энергии в тепловую), рассеяния (отражения в различных направлениях от неоднородностей среды) и расхождения поля УЗК.

В металлах затухание ультразвуковых волн всех типов происходит в основном вследствие рассеяния. Оно очень велико, если средние размеры зерна $\overline{D}$ примерно равны или больше длины волны λ, причем оно достигает максимума в интервале $\lambda = (2 \div 4)\,\overline{D}$. При $\lambda \ll \overline{D}$ затухание определяется в основном поглощением. В области $4 \leqslant \frac{\lambda}{D} \leqslant 10$ расстояние пропорционально $\overline{D} f_2$, где f — частота ультразвука. При $\lambda > 10\overline{D}$ затухание обусловлено в основном релеевским рассеянием ультразвука.

Затухание поверхностной волны дополнительно зависит от шероховатости поверхности, а при контроле вогнутой поверхности — от радиуса ее кривизны R. При грубой обработке (менее ▽5) или при $R = (1 \div 5)\,\lambda_{пов}$ затухание поверхностных волн значительно. При $R > 30\,\lambda_{пов}$ оно практически отсутствует.

Затухание нормальной волны зависит также от шероховатости поверхности и дополнительно от толщины стенки изделия. Кривизна поверхности на прохождение нормальной волны не влияет.

При распространении поверхностной или нормальной волны в детали, находящейся в контакте с жидкостью, происходит также ослабление ее интенсивности из-за перехода энергии в жидкость.

Отражение ультразвуковых волн. Волна, встретив на своем пути препятствие *, например несплошность материала размером

* Под препятствиями для ультразвука понимают участки среды, где акустическое сопротивление значительно отличается от акустического сопротивления основной среды.

меньше 1/3 длины волны, не отражается, а огибает его. Это явление называется дифракцией.

Для получения интенсивного отражения энергии УЗК от дефекта необходимо, чтобы его размеры в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны, были больше 1/3 λ (значения λ при $f = 2{,}5$ МГц см. в табл. 14). Доля отражен-

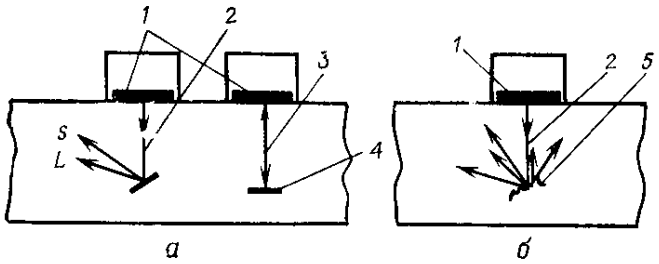


Рис. 6.5. Зеркальное (*а*) и диффузное (*б*) отражение ультразвуковых волн:

1 — пьезопластина искателя; *2* — падение УЗК на дефект под углом; *3* — нормальное падение УЗК на дефект; *4* — отражающая поверхность дефекта гладкая (шероховатость значительно меньше длины волны); *5* — отражающая поверхность дефекта шероховатая

ной от дефекта энергии определяется также отражательной способностью его поверхности (рис. 6.5), углом встречи поверхности дефекта с лучом, шириной раскрытия дефекта в направлении луча и свойствами вещества, находящегося в полости дефекта. Отражение от реальных дефектов всегда имеет диффузный характер (рассеянное отражение, рис. 6.5, *б*). Ширина трещины для ее выявления ультразвуком должна быть более 1 мкм. Если полость трещины заполнена керосином или минеральным маслом, то отражательная способность ее снижается. Наибольшую энергию отражают дефекты, расположенные перпендикулярно к ультразвуковому лучу.

Интерференция ультразвуковых волн. При непрерывном излучении ультразвуковые волны могут накладываться одна на другую. В случае наложения двух близких по частоте волн, например падающей (зондирующей) и отраженной, возникает явление интерференции — усиление колебаний в одних точках и ослабление их в других.

В результате наложения двух встречных волн с одинаковой амплитудой, например падающей и бегущей навстречу ей отраженной, возникает так называемая стоячая волна. Характерным для этой волны является наличие неподвижных точек, так называемых узлов и пучностей. Расстояние между соседними узлами или пучностями в стоячей волне равно λ/2.

При распространении УЗК в металле с крупнозернистой структурой возможно многократное отражение ультразвуковых волн от границ зерен, т. е. возможна так называемая структурная реверберация, а при распространении в деталях небольших габаритов — многократное отражение от граней деталей (объемная реверберация). Эти волны, попадая на излучатель, могут вызвать реверберационные сигналы-помехи.

§ 6.5. Методы акустической дефектоскопии

В условиях эксплуатации авиационной техники, как указывалось, применяют три метода акустической дефектоскопии.

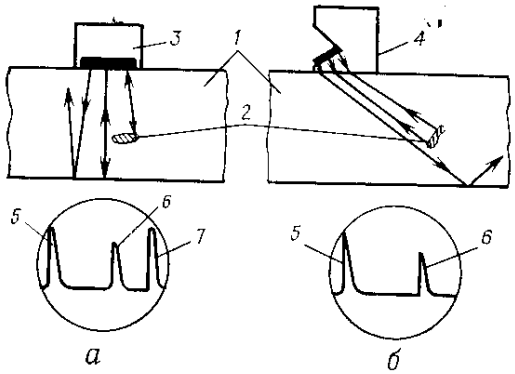


Рис. 6.6. Схема прозвучивания эхо-импульсным методом с применением прямого (*а*) и наклонного (*б*) искателей:

1 — деталь; *2* — дефект; *3* и *4* — прямой и наклонный искатели; *5* — начальный сигнал; *6* — эхо-сигнал от дефекта; *7* — донный сигнал

Эхо-импульсный метод наиболее распространен. Он основан на регистрации отраженной от поверхности несплошности материала (трещин, коррозии, раковин и т. д.) или других отражателей ультразвуковой волны. Для излучения и приема ультразвуковой волны при этом методе чаще используют один излучатель, выполняющий функции излучения и приема УЗК (совмещенная схема включения). Индикатором эхо-сигналов импульсного дефектоскопа в основном служат электронно-лучевые трубки (ЭЛТ); могут быть дополнительные оптические или звуковые индикаторы. Эхо-сигналы на экране ЭЛТ видны в виде вертикальных всплесков (пиков) развертки электронного луча (рис. 6.6). Амплитуда эхо-сигнала зависит от отраженной энергии УЗК.

Чувствительность эхо-импульсного метода определяется минимальной площадью дефектов, надежно выявляемых в деталях. Она зависит от однородности и зернистости материала детали, характера дефекта, соотношения длины волны и размера дефекта, глубины его залегания, шероховатости поверхности, затухания УЗК в материале детали, акустических свойств покрытия и

среды, контактирующей с деталью, качества акустического контакта искателя с деталью, температуры, при которой ведется контроль, и основных параметров дефектоскопа (частоты колебаний, мощности и длительности импульсов, конструкции искателей). При контроле кромок лопаток поверхностными волнами на частоте

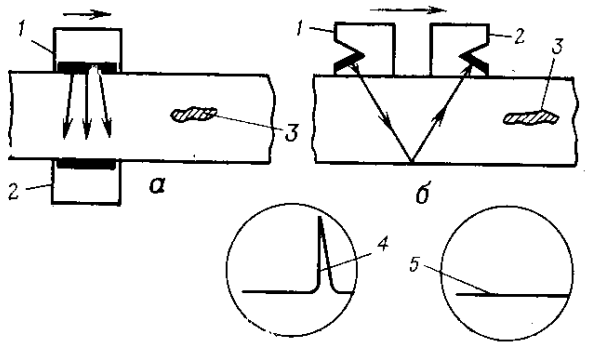


Рис. 6.7. Схема прозвучивания теневым (*а*) и зеркально-теневым (*б*) методами:

1 и *2* — излучающий и приемный искатели; *3* — дефект; *4* — эхо-сигнал (вид развертки) на экране ЭЛТ при отсутствии дефекта; *5* — эхо-сигнал (вид развертки) на экране ЭЛТ при наличии круглого дефекта

2,5 МГц наименьшая площадь выявляемых дефектов составляет 0,06 мм², а при контроле стальных деталей продольными волнами на той же частоте — 1 мм². В обоих случаях дефект удален от искателя на одинаковое расстояние (100 мм).

Теневой метод используют для контроля деталей несложной формы и небольшой толщины (листового проката, труб, профилей и др.). При контроле этим методом с одной стороны детали в материал посылают непрерывную или импульсную ультразвуковую волну, а с противоположной ее стороны регистрируют прошедшую волну (рис. 6.7, *а*). Если при перемещении искателя на пути УЗК встретится дефект, то в зависимости от его размера и вида ультразвуковые волны полностью или частично отразятся от него (например, от трещины) или погасятся (пористостью металла). О наличии дефекта судят по полному исчезновению эхо-сигнала *4* или по значительному уменьшению его амплитуды.

Разновидностью теневого метода является **зеркально-теневой (или эхо-теневой) метод** (рис. 6.7, *б*). При контроле этим методом излучающий *1* и приемный *2* искатели размещают с одной стороны детали на некотором расстоянии один от другого (оно зависит от толщины детали). Ультразвук от излучателя распространяется по металлу и, отразившись от противоположной стороны детали, воспринимается приемным искателем. Эхо-сигнал *4*, появившийся на экране ЭЛТ, характеризует хорошее качество металла и отсутствие дефектов в контролируемом месте детали.

Если же на пути ультразвука находится дефект, то эхо-сигнал *4* сильно уменьшается или исчезает, как и в предыдущем случае.

Основным недостатком теневых методов по сравнению с эхо-импульсным является низкая чувствительность, которая в большей мере, чем при контроле эхо-импульсным методом, зависит

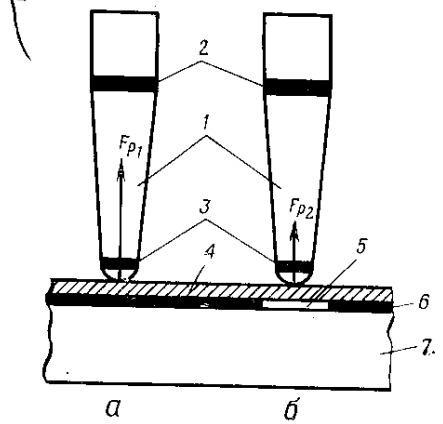


Рис. 6.8. Схема контроля деталей импедансным методом:

а и *б* — положения датчика соответственно над участками без дефекта и с дефектом; *1* — датчик; *2* и *3* — излучающая и силоизмерительная пьезопластины; *4* — обшивка; *5* — непроклей; *6* — клеевое или паяное соединение; *7* — внутренний элемент конструкции

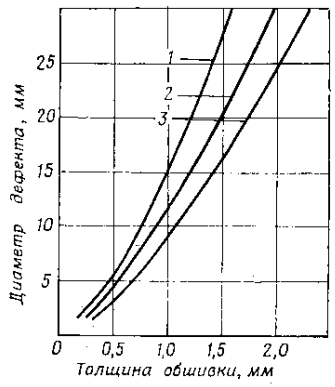


Рис. 6.9. Зависимость минимального диаметра дефекта, выявляемого импедансным методом, от толщины обшивки: стальной (*1*), титановой (*2*) и алюминиевой (*3*)

от расстояния между дефектом и искателем, отношения площади дефекта к размерам ультразвукового поля в сечении, а также от коэффициента затухания УЗК. Кроме того, на уменьшение амплитуды сигналов, по которым определяют дефекты, могут оказывать влияние такие факторы, как отсутствие контактной смазки, перекос искателя, неплотное прилегание его из-за шероховатости или кривизны поверхности детали и т. д. Поэтому в случае уменьшения величины сигнала контроль соответствующего участка детали повторяют несколько раз, строго следя за режимами контроля.

Импедансный метод основан на фиксировании дефекта по изменению амплитуды силы реакции (амплитудный вариант) или по сдвигу фазы силы реакции (фазовый вариант) контролируемого изделия на датчик. Датчиком является стержень, совершающий продольные колебания (рис. 6.8). Метод применяют для выявления дефектов в клеевых и паяных соединениях многослойных конструкций и расслоений в изделиях из слоистых пластиков. Контроль проводят при доступе к изделию с одной стороны.

При контроле этим методом в многослойном изделии возбуждают изгибные колебания звукового диапазона. На участке

изделия без дефекта (рис. 6.8, *а*) вся многослойная конструкция колеблется как единое целое и сила реакции F_{p_1} изделия на стержень, определяемая в основном жесткостью изделия, имеет значительную величину. В случае расположения стержня над дефектом *5* (непроклеем или непропаем, рис. 6.8, *б*) изгибные колебания возбуждаются только в наружном слое (обшивке). Поскольку жесткость обшивки существенно меньше жесткости всей конструкции, то сила реакции F_{p_2} уменьшается. Изменение амплитуды или фазы силы реакции фиксируется индикатором импедансного дефектоскопа. Увеличение толщины обшивки, уменьшение отношения жесткости конструкции к жесткости обшивки, увеличение шероховатости и кривизны поверхности изделия приводят к снижению чувствительности метода.

График зависимости минимального диаметра дефекта, выявляемого импедансным методом, от толщины обшивки, соединенной со сплошным металлическим внутренним элементом, показан на рис. 6.9.

§ 6.6. Ультразвуковые искатели

Искатели предназначены для работы в комплекте с дефектоскопами в качестве ультразвуковых преобразователей. Они служат для получения УЗК, ввода их в материал контролируемой детали, приема отраженных от дефектов эхо-сигналов и преобразования их в электрические.

По конструктивному выполнению искатели разделяют на наклонные преломляющие (призматические), прямые (нормальные) и раздельно-совмещенные. Все искатели этих типов могут быть разборными или неразборными. Наклонные искатели изготовляют с различным углом падения УЗК β (см. рис. 6.3, *б, в* и *г*). Они могут возбуждать поверхностные, нормальные и поперечные волны. Прямые и раздельно-совмещенные искатели возбуждают только продольные волны.

Искатель любого типа рассчитан на одну рабочую частоту.

Для контроля деталей авиационной техники в эксплуатации широко применяют специализированные наклонные и прямые искатели типа АИГ.

Наклонный разборный искатель типа АИГ (рис. 6.10, *а*) состоит из призмы *4* (органическое стекло), на которой закреплен пакет пьезоэлемента, и штепсельного разъема *5*. В корпусе *1* пакета размещены пьезопластина *2* (цирконат титанат свинца ЦТС-19), демпфер *3* (асбестовая прокладка, обернутая фольгой *6*) и текстолитовая прокладка *7*. К фольге и посеребренной поверхности пьезопластины, контактирующей с призмой, подведены провода от штепсельного разъема. С помощью винта *8* пьезопластину прижимают к призме. Путем увеличения усилия нажима изменяют степень демпфирования пьезопластины, в результате чего устраняются УЗК, излучаемые в сторону демпфера, которые бы создавали на экране помехи, а также умень-

шается длительность зондирующего импульса. Однако при этом резко уменьшается его мощность, поэтому чрезмерно поджимать демпфер к пьезопластине не следует. При сборке искателя для обеспечения акустического контакта на плоскость призмы, сопри-

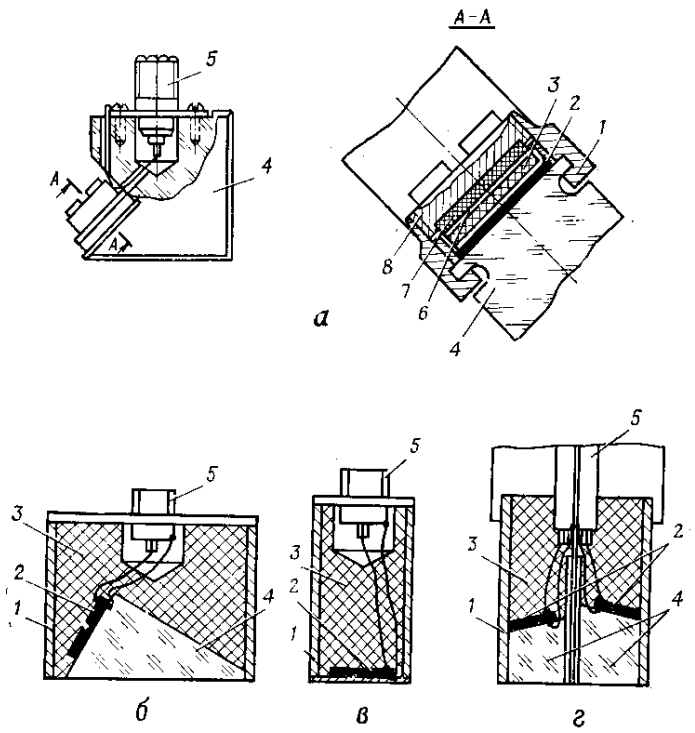


Рис. 6.10. Типы ультразвуковых искателей: наклонные типа АИГ — разборный (*а*) и неразборный (*б*); прямой неразборный (*в*) и раздельно-совмещенный неразборный (*г*):
1 — корпус; *2* — пьезопластина; *3* — демпфер; *4* — призма; *5* — штепсельный разъем; *6* — фольга; *7* — прокладка; *8* — винт

касающуюся с пьезопластиной, наносят тонкий слой масла МК-20 или смазки ЦИАТИМ-201. Форма призмы и обработка ее граней выполнены так, что отраженные от контактной поверхности УЗК (см. рис. 6.3, *б, в, г*) рассеиваются внутри призмы, не попадая на пьезопластину. Контактная поверхность призмы, т. е. поверхность, соприкасающаяся с проверяемой деталью, выполнена различной формы: плоской, цилиндрической (вогнутой, выпуклой), Г-образной, трапециевидной и прямоугольной, что обеспечивает хорошее прилегание к поверхностям деталей различной формы и лучший ввод энергии УЗК в металл. В зависимости от назначения искатели типа АИГ имеют дополнительные конструктивные

элементы: ручки с механизмом для подачи жидкости к контактной поверхности, приспособления и устройства для фиксирования искателя относительно детали и др.

Неразборные искатели — наклонный типа АИГ, прямой и раздельно-совмещенный (рис. 6.10, *б*, *в* и *г*) — содержат те же основные элементы, которые имеются в разборном. В корпусе *1* (цилиндрической или призматической формы) размещены пьезопластина *2*, демпфер *3* и призма *4*, а к самому корпусу прикреплен штепсельный разъем *5*. В качестве демпфера в прямом искателе служит текстолит, хорошо поглощающий УЗК, а в неразборном типа АИГ и раздельно-совмещенном — эпоксидная смола с наполнителем — порошкообразной резиной.

В прямом искателе пьезопластина приклеена к демпферу, а нижняя поверхность ее защищена тонким донышком из износостойкого материала, например из металлокерамики. В неразборном искателе типа АИГ пьезопластины приклеены к призмам с определенным углом наклона. В раздельно-совмещенном искателе угол наклона призм с излучающей и приемной пластинами делают небольшим (не более 7°), при котором поперечная волна в стальных деталях практически не возбуждается. Призмы в этом искателе разделены специальным экраном для предохранения пластин от наводки высокочастотных механических и электрических колебаний при их работе.

Разборные искатели типа АИГ с течением времени могут ухудшить свою чувствительность из-за пропитки асбестовой прокладки маслом, высыхания масла под пьезопластиной, разрушения пьезопластины или потери ею пьезоэлектрических свойств. Для восстановления чувствительности пакет искателя разбирают, заменяют пропитавшийся маслом демпфер и вводят масло под пьезопластину. Разрушенные и потерявшие пьезоэлектрические свойства пластины не используют.

Неразборные искатели по сравнению с разборными более долговечные; они реже отказывают в работе. Вышедшие из строя неразборные искатели обычно не ремонтируют, а заменяют новыми.

§ 6.7. Основные технические характеристики и принципы работы ультразвуковых импульсных и акустических импедансных дефектоскопов

Основными эксплуатационными характеристиками дефектоскопа являются его чувствительность, разрешающая способность, дальность прозвучивания, система выделения полезного сигнала и способы его индикации, конструкция глубиномера и его точность, величина мертвой (неконтролируемой) зоны детали, портативность и питание дефектоскопа (автономное или от аэродромных источников тока). Под разрешающей способностью понимают минимальное расстояние между двумя отражателями ультразвука, следующими один за другим в направлении прозвучивания детали, эхо-сигналы от которых на экране дефектоскопа не сливаются. Далее рассмотрены характеристики и принципы работы ультразвуковых импульсных и акустических импедансных дефектоскопов, применяемых для контроля деталей в условиях эксплуатации авиационной техники.

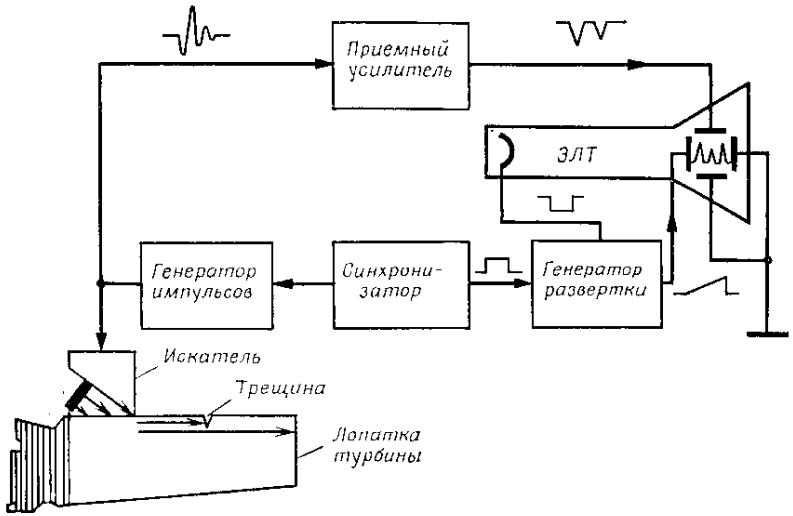


Рис. 6.11. Блок-схема ультразвукового дефектоскопа УЗДЛ-61-2М

Портативный ультразвуковой дефектоскоп УЗДЛ-61-2М применяют в комплекте с искателями типа АИГ для контроля кромок рабочих лопаток роторов турбин и компрессоров, кожухов камер сгорания, диска I ступени ротора компрессора авиационных двигателей и других деталей. Этот специализированный дефектоскоп является наиболее простым по конструкции. Работает по принципу эхо-импульсного метода. Рабочая частота УЗК 2,5 МГц. Блок-схема дефектоскопа приведена на рис. 6.11. Все блоки собраны на электронных лампах.

Синхронизатор (задающий генератор) вырабатывает синхронизирующие импульсы частотой 400—500 Гц, которые одновременно возбуждают генератор импульсов и генератор развертки. Изменением частоты синхронизирующих импульсов меняют дальность прозвучивания.

Генератор высокочастотных электрических импульсов (возбудитель пьезопластины) представляет собой электрический колебательный контур, в котором конденсатором является пьезопластина, а индуктивностью — катушка. Частота электрических колебаний контура, подбираемая при изготовлении дефектоскопа, равна резонансной частоте механических колебаний (УЗК) пьезопластины (2,5 МГц). Поступившим от синхронизатора импульсом контур возбуждается. В нем возникают синусоидальные колеба-

ния напряжения частотой 2,5 МГц, которые в течение времени 1—1,5 мкс затухают. Длительность $\tau_и$ электрических возбуждающих колебаний (рис. 6.12, *а*) зависит от соотношения индуктивного и активного сопротивлений контура. В одном электрическом импульсе при $f = 2{,}5$ МГц содержатся три—пять колебаний. Возбуждаемые механические колебания пьезопластины также затухают (рис. 6.12, *б*; *А* — смещение колеблющейся пластины). Длительность $\tau_{з.и}$ механических колебаний — зондирующего импульса больше длительности электрических и зависит от характеристик пьезопластины и степени ее демпфирования. Через 2—2,5 мс после прекращения колебаний контур вновь возбуждается синхронизирующим импульсом, вырабатывая такие же затухающие колебания.

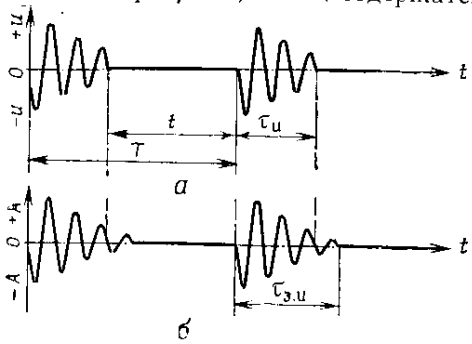


Рис. 6.12. Периодически повторяющиеся импульсы высокочастотных электрических (*а*) и механических (зондирующих) колебаний (*б*)

Ультразвуковые импульсы вводятся искателем в металл контролируемой детали. После отражения от дефектов и (или) конца детали они возвращаются в виде эхо-сигналов обратно на пьезопластину искателя, где преобразуются в импульсы напряжения, поступающие через контур генератора на усилитель. За время паузы (2—2,5 мс) ультразвуковая волна, отразившись от самого дальнего отражателя (конца детали), успевает возвратиться обратно к пьезопластине задолго до посылки следующего импульса. Когда на пути распространения УЗК встречается дефект, то часть ультразвуковой энергии отражается от него раньше, чем от конца детали. Таким образом, эхо-сигналы искателя поступают на усилитель со сдвигом по времени — вслед за зондирующим поступает эхо-сигнал от дефекта, а затем — от конца детали.

Длительность зондирующего импульса $\tau_{з.и}$ важный параметр всякого импульсного дефектоскопа, от которого зависят, как будет показано далее, мощность импульса, временна́я мертвая зона и разрешающая способность дефектоскопа. В универсальных дефектоскопах предусмотрены специальные регуляторы мощности зондирующего импульса, работающие на основе изменения импульса $\tau_и$ и амплитуды колебаний пьезопластины.

Приемный усилитель не только усиливает поступающие от искателя электрические колебания (в зондирующем импульсе и в эхо-сигналах), но и преобразует их в видеоимпульсы, которые подаются к пластинам вертикального отклонения луча

ЭЛТ. Усилитель настроен на резонансную частоту пьезопластины. Входным контуром усилителя служит колебательный контур генератора импульсов. Поэтому в момент работы генератора усилитель находится под сильной перегрузкой (сотни вольт), что сопровождается временной потерей им чувствительности (усилитель запирается на некоторое время). Для предохранения усили-

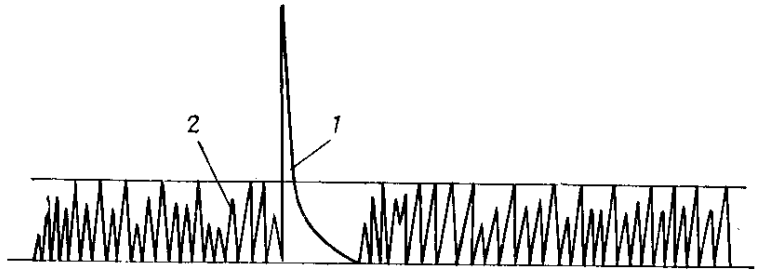


Рис. 6.13. Отсечка шумов *2* при детектировании полезного эхо-сигнала *1*

теля от перегрузок в момент образования зондирующего импульса, а также для выравнивания чувствительности дефектоскопа при прозвучивании деталей малых и больших размеров в нем применена автоматическая временна́я регулировка чувствительности (ВРЧ).

Усиленный электрический сигнал детектируется. При этом нижняя часть сигнала, соответствующая реверберационным и другим шумам *2* (рис. 6.13), срезается. Уровень отсекаемой части поступающих на ЭЛТ сигналов в универсальных дефектоскопах ДУК-66П, УДМ-3 и других регулируется специальным регулятором ОТСЕЧКА. В дефектоскопе УЗДЛ-61-2М это осуществляется ручкой регулировки усиления. Чтобы при прозвучивании деталей не пропустить полезный сигнал *1*, рекомендуется устанавливать минимальную отсечку шумов.

Генератор развертки служит для получения временно́й линии развертки на экране ЭЛТ. Он возбуждается одновременно с передачей зондирующего импульса и вырабатывает линейно-возрастающее (пилообразное) напряжение, подводимое к пластинам горизонтального отклонения электронного луча ЭЛТ. Поступающие от усилителя к вертикально отклоняющим пластинам трубки видеоимпульсы со сдвигом по времени дают на экране соответствующие сигналы: зондирующий (начальный), отраженный от дефекта (промежуточный) и отраженный от конца детали (концевой). По длине развертки между начальным и промежуточным сигналами можно определить расстояние до дефекта в направлении прозвучивания. В универсальных дефектоскопах для определения координат залегания дефекта существуют специальные устройства — глубиномеры.

Блок питания (полупроводниковый преобразователь) вырабатывает необходимые напряжения для питания анодных цепей ламп дефектоскопа (400 и 185 В) и ЭЛТ (1800 В).

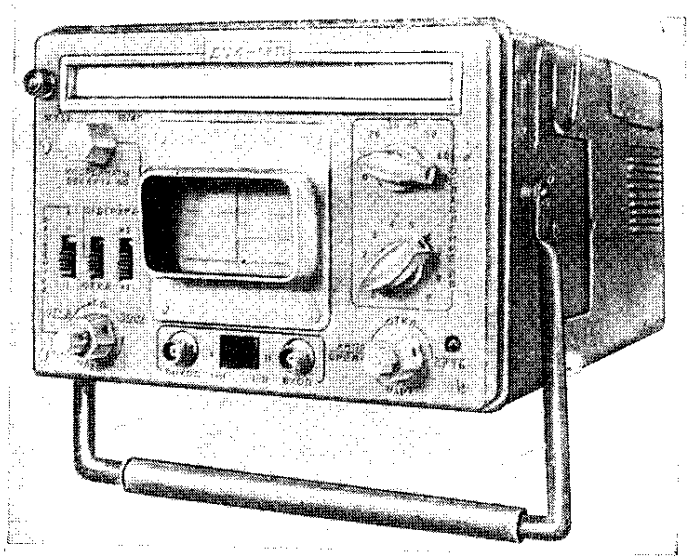


Рис. 6.14. Ультразвуковой импульсный дефектоскоп ДУК-66П

На переднюю панель дефектоскопа выведены ручки ЯРКОСТЬ, ФОКУСИРОВКА и СМЕЩЕНИЕ для регулировки и установки по горизонтали развертки луча ЭЛТ, ОГРАН. — для регулировки чувствительности дефектоскопа и РАЗВ. — для регулировки длительности развертки (дальности прозвучивания). Наибольшая дальность (глубина) прозвучивания стали — 400 мм.

Мертвые зоны дефектоскопа при контроле кромок лопаток и кожухов камер сгорания составляют: ближняя — 20—25 мм, дальняя — 7 мм. Габариты дефектоскопа — 290×126×165 мм; масса — 3 кг. Питание — от сети постоянного тока 27 В; потребляемая мощность — 35 Вт.

Дефектоскопы УЗДК-1 и УЗДБ-1 по конструкции аналогичны дефектоскопу УЗДЛ-61-2М. Они снабжены специальными искателями для контроля барабанов и реборд авиационных колес и главных балок тележек шасси соответственно.

Портативный ультразвуковой дефектоскоп ДУК-66П используют для контроля сварных швов рам, осей поворотных узлов, шпангоутов и других деталей в аэродромных условиях.

Прибор (рис. 6.14) универсален, выполнен полностью на транзисторах, может работать от аккумуляторной батареи напряжением 9 В или через специальный блок от сети 220/127В 50 Гц.

Этот блок может быть использован и для зарядки аккумулятора. Мощность, потребляемая дефектоскопом, не более 40 В·А. Габариты — 260×170×435 мм; масса — 9 кг. В комплекте дефектоскопа имеются прямые, наклонные и раздельно-совмещенные

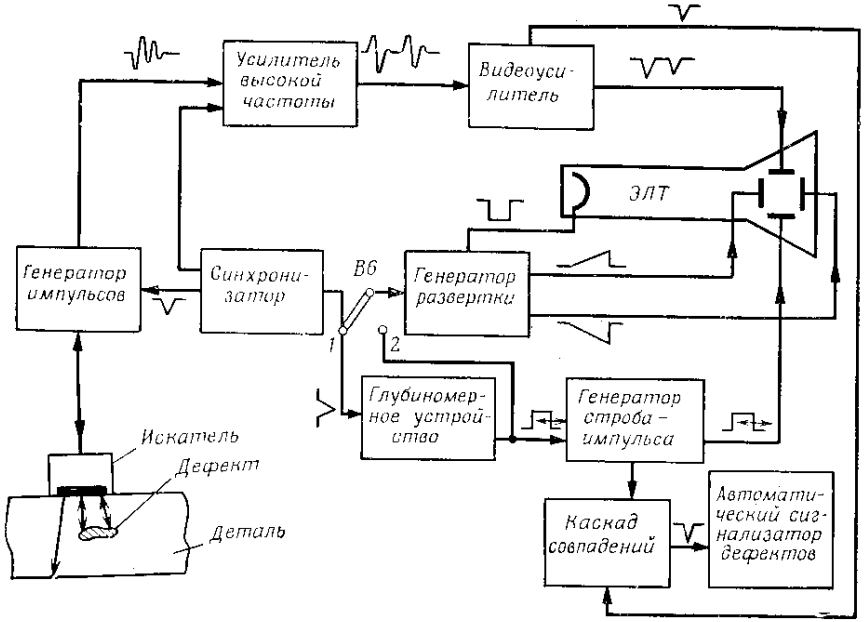


Рис. 6.15. Блок-схема ультразвукового дефектоскопа ДУК-66П

искатели. Рабочие частоты УЗК (1,25; 2,5; 5 и 10 МГц) устанавливают с помощью сменных катушек индуктивности, придаваемых к прибору. Индикаторами являются ЭЛТ и звуковой сигнализатор. Дефектоскоп имеет встроенный аттенюатор (калиброванный делитель напряжения) для измерения амплитуды эхо-сигналов, проградуированный в децибелах. Он оснащен, как видно на блок-схеме (рис. 6.15), электронным глубиномером, устройствами задержки развертки, стробирующего импульса (строба-импульса) и автоматического сигнализатора дефектов (АСД). Он позволяет вести контроль эхо-импульсным методом в режимах без задержки и с задержкой развертки, а также теневым методом.

Принцип работы дефектоскопа по эхо-импульсному методу в режиме без задержки развертки (при установке выключателя В6 в положение 1) аналогичен принципу работы прибора УЗДЛ-61-2М. Работу дефектоскопа в режиме с задержкой развертки и АСД обеспечивает глубиномерное устройство, основным назначением которого является определение координат залегания

дефекта относительно точки ввода осевого (центрального) луча. Погрешность глубиномера составляет ±3% от определяемого значения.

При установке выключателя В6 в положение 2 глубиномер позволяет запустить устройства задержки развертки и строба-импульса, с помощью которых можно выделить для контроля

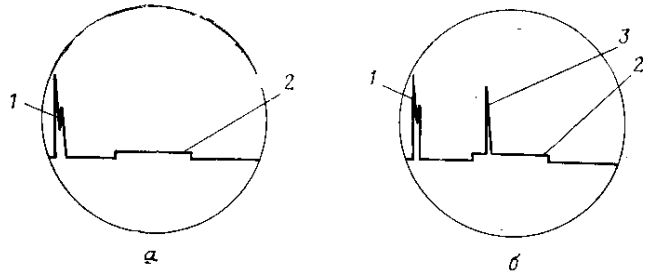


Рис. 6.16. Изображение строба-импульса на экране дефектоскопа при работе в режиме с задержкой развертки:

а — при отсутствии дефекта в зоне контроля; *б* — при наличии дефекта; *1* — начальный сигнал; *2* — строб-импульс; *3* — эхо-сигнал от дефекта

любую зону детали в направлении прозвучивания. Генератор строба-импульса вырабатывает прямоугольный импульс, поступающий к вертикально отклоняющим пластинам ЭЛТ (рис. 6.16, *а*). Участок развертки от начального сигнала *1* до левого фронта строба-импульса есть интервал времени задержки развертки от момента излучения зондирующего импульса до момента начала возникновения строба-импульса; расстояние между левым и правым фронтами — длительность строба-импульса. Во время задержки развертки приемный усилитель заперт. Он открывается лишь на время длительности строба-импульса. Длительность строба-импульса обусловливает длину зоны контроля, а время задержки развертки — длину неконтролируемого участка (от точки ввода УЗК до начала зоны контроля). При наличии дефекта в зоне контроля на экране ЭЛТ эхо-сигнал *3* возникает только в области строба-импульса (рис. 6.16, *б*). Эхо-сигналы, отраженные от участков детали, которым соответствует развертка вне пределов строба-импульса, на экран не проходят. Время задержки развертки и длительность строба-импульса можно плавно регулировать, тем самым проверять зоны детали различной длины, расположенные на различных расстояниях от точки ввода УЗК.

Для срабатывания АСД от эхо-сигналов, вызванных дефектами в зоне контроля, импульсы с выхода видеоусилителя и схемы генератора строба-импульса подаются на каскад совпадения. В случае наличия дефекта в зоне контроля на выходе каскада совпадений получается импульс, который запускает мультивибратор звуковой сигнализации дефекта. Уровень срабатывания

схемы АСД при эхо-сигнале от дефекта — 15 мм и более по экрану ЭЛТ.

Дефектоскоп допускает непрерывную работу в течение 8 ч (не менее) при питании от сети переменного тока. Максимальная глубина прозвучивания стали (Ст. 45) — 2500 мм.

Ультразвуковые дефектоскопы УДМ-3 и УДМ-1М применяют для контроля лопастей и стаканов воздушных винтов, переднего вала винта, стыковых сварных швов рам и других деталей.

Рабочие частоты прибора УДМ-3—0,6; 1,8; 2,5 и 5 МГц, а прибора УДМ-1М —0,8; 1,8; 2,5 и 5 МГц. Индикаторами являются ЭЛТ и световой сигнализатор. Дефектоскопы снабжены, так же как и прибор ДУК-66П, электронным глубиномером, устройствами задержки развертки («лупой времени»), стробирующего импульса и АСД. Максимальная глубина прозвучивания стали Ст. 45 — 2500 мм. Дефектоскопы позволяют при частоте УЗК 5 МГц обнаруживать дефекты с отражающей поверхностью 1 мм^2 и более на глубине 100 мм. При прозвучивании больших толщин чувствительность падает. Чувствительность регулируется четырьмя ручками: МОЩНОСТЬ, ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ, ОТСЕЧКА и ВРЧ.

Минимальная глубина, с которой начинается обнаружение дефектов (мертвая зона), при пользовании прямыми искателями на частоте 5 МГц равна 8 мм; на частоте 2,5 МГц — 10 мм, на частоте 1,8 МГц — 12 мм и на частоте 0,6 МГц — 50 мм. При пользовании раздельно-совмещенными искателями на частотах 2,5 и 5 МГц мертвая зона равна соответственно 2,0 и 0,5 мм, а при работе наклонными искателями — 2 мм.

Погрешность измерения расстояния от искателя до дефекта, а также толщины изделий не более ±2÷3% от измеряемого значения.

Питание дефектоскопов — от сети 36 и 220 В 50 Гц. Потребляемая мощность — не более 180 В·А. Габариты — 220×335×423 мм; масса — 19 кг.

Приборы УДМ-1М и УДМ-3 отличаются один от другого схемами некоторых каскадов и типом ЭЛТ.

Импедансные акустические дефектоскопы ИАД-3 (рис. 6.17) **и ИАД-2** применяют для выявления дефектов клеевых и паяных соединений между сравнительно тонкой обшивкой (из алюминиевого сплава толщиной около 2 мм, из стали — 1,5 мм) и элементами жесткости (лонжероном, нервюрой) или заполнителем (сотами, пенопластом и др.) в многослойных конструкциях, а также расслоений в изделиях из слоистых пластиков.

Работа приборов основана на импедансном методе — измерении амплитуды реакции изделия на колеблющийся стержень датчика (ИАД-2) и на измерении амплитуды и фазы силы реакции (ИАД-3).

Блок-схема прибора ИАД-3 приведена на рис. 6.18. Датчик прибора представляет собой конический стержень из органиче-

ского стекла. На верхнем торце стержня установлена излучающая пьезопластина из ЦТС-19(*1*), а на нижнем — пьезопластина *2* (силоизмерительный элемент). Генератор прибора вырабаты-

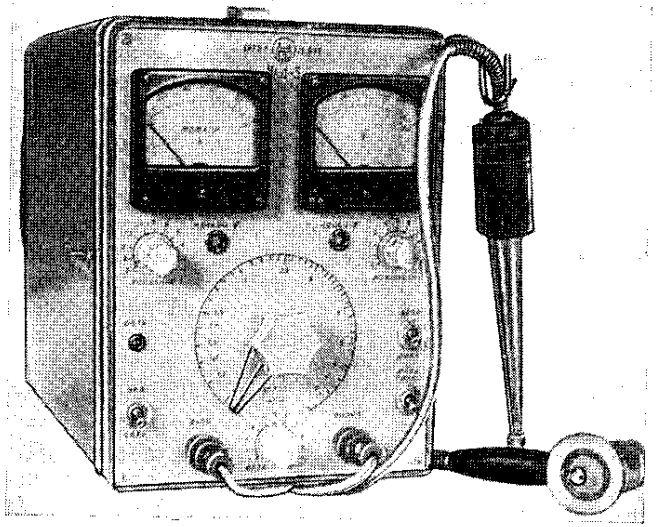


Рис. 6.17. Импедансный акустический дефектоскоп ИАД-3

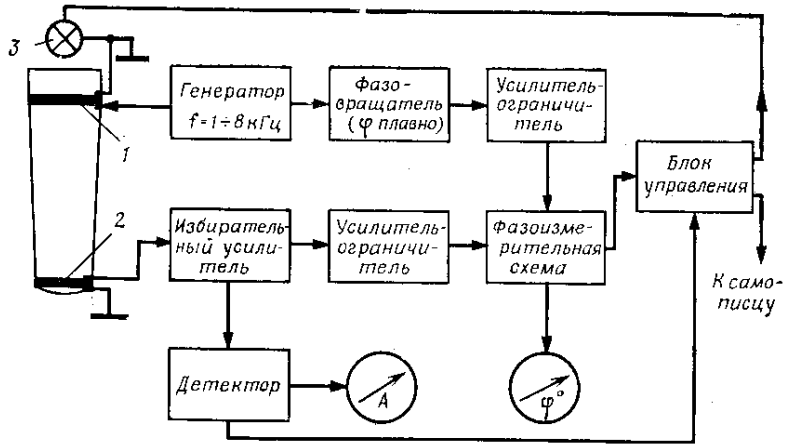


Рис. 6.18. Блок-схема импедансного акустического дефектоскопа ИАД-3:
1 — излучающая пьезопластина из ЦТС-19; *2* — пьезопластина (силоизмерительный элемент); *3* — сигнальная лампочка

вает синусоидальные электрические колебания, частота которых плавно регулируется от 1000 до 8000 Гц. Они подаются на излучающую пьезопластину датчика, которая возбуждает в стержне

продольные упругие колебания. Силоизмерительный элемент соединен со входом избирательного усилителя. Электрическое напряжение на этом элементе и на входе усилителя пропорционально силе реакции изделия на стержень. При наличии дефекта (непроклея или непропая) происходит уменьшение силы реакции, вызывающее уменьшение амплитуды и сдвиг фазы напряжения на силоизмерительном элементе. Измененное напряжение, пройдя через избирательный усилитель, поступает на два раздельных канала — амплитудный и фазовый, в которых вырабатываются сигналы, пропорциональные изменению амплитуды или фазы и регистрируемые стрелочными индикаторами *A* и φ°. При наличии дефекта индикатор *A* показывает уменьшение амплитуды сигнала, а индикатор φ° — сдвиг его фазы (как правило, не менее 60°). Если эти изменения достигают некоторого заданного уровня, то срабатывает устройство, которое включает сигнальную лампочку *3*, смонтированную внутри датчика. Она является дополнительным индикатором наличия дефекта.

§ 6.8. Мертвые зоны и разрешающая способность дефектоскопа

Мертвые зоны (МЗ) — это неконтролируемые участки у искателя (ближняя МЗ длиной $L_б$) и у конца или «дна» детали (дальняя МЗ длиной $L_д$); они являются важными характеристиками дефектоскопов. Дальняя МЗ фактически является характеристикой разрешающей способности дефектоскопа. При поиске внутренних дефектов мертвые зоны $L_б$ и $L_д$ определяются наименьшим расстоянием от поверхности до дефекта, при котором от него возникает отдельный эхо-сигнал, не сливающийся с начальным или с «донным». При поиске поверхностных дефектов ближняя и дальняя МЗ — это наименьшие расстояния соответственно от точки ввода УЗК до дефекта и от конца детали до дефекта, при которых возникают отдельные эхо-сигналы.

Размер МЗ зависит от различных факторов: длительности зондирующих импульсов, времени восстановления чувствительности приемного усилителя после окончания воздействия зондирующего импульса, типа волн и частоты УЗК, конструкции и размеров искателей, способов их включения, размеров и акустических свойств материала проверяемой детали. В зависимости от преобладающего фактора различают временну́ю и геометрическую МЗ.

Временна́я МЗ зависит от параметров дефектоскопа (длительности зондирующего импульса $\tau_{зп}$ и времени восстановления чувствительности усилителя $\tau_у$ и имеет большое значение при

работе совмещенными прямыми искателями. Для этих искателей ближняя МЗ может быть определена из выражения

$$L_б = \frac{(\tau_{з.и} + \tau_у)\, c_{пр}}{2},$$

где $c_{пр}$ — скорость распространения продольной волны (см. табл. 14).

При работе совмещенными наклонными искателями, возбуждающими поперечные волны:

$$L_б = \frac{(\tau_{з.и} + \tau_у - 2t_п)\, c_{поп}}{2} \cos \alpha_s,$$

где $t_п$ — время прохождения зондирующего импульса через призму;

$c_{поп}$ — скорость распространения поперечной волны;

α_s — угол ввода поперечной волны.

Так как на практике обычно $\tau_{з.и} + \tau_у < 2t_п$, то временна́я МЗ наклонных искателей относительно мала (не более 2 мм). Для этих искателей существенна геометрическая МЗ. Кроме того, наклонные искатели в ряде случаев не обеспечивают выявления дефектов, расположенных близко от места ввода УЗК, из-за сигналов-помех у начального сигнала, вызванных конструктивными особенностями искателя.

Разрешающая способность дефектоскопа (дальняя мертвая зона для всех типов искателей) определяется по формуле

$$L_д = \frac{c\tau_{з.и}}{2},$$

где c — скорость ультразвуковой волны в материале контролируемой детали.

Так как $c_{пов} < c_{пр}$, то при контроле поверхностной волной дальняя МЗ будет меньше, чем при контроле продольной.

Для уменьшения временно́й МЗ уменьшают длительность зондирующих импульсов, улучшая способы демпфирования пьезопластин в искателях (добиваясь, чтобы $\tau_{з.и}$ было близко к $\tau_и$, см. рис. 6.12), и применяют систему временно́й регулировки чувствительности (ВРЧ) в приемном усилителе дефектоскопа. При работе на одном и том же дефектоскопе уменьшить временну́ю МЗ можно, работая на более высоких частотах (так как чем выше рабочая частота искателя, тем меньше $\tau_{з.и}$).

Размер геометрической мертвой зоны зависит в основном от траектории хода луча в металле и размера контактной поверхности искателя.

При прозвучивании вдоль образующей стенки *1* (рис. 6.19) цилиндров, балок и других деталей с постоянным сечением многократно отраженной поперечной волной имеются непрозвучиваемые участки M и M', которые можно проверить передвижением

искателя *2* по образующей стенки и перестановкой его на 180° (для контроля в обратном направлении).

При контроле поверхностной и нормальной волнами размер ближней МЗ определяется в основном размерами контактной

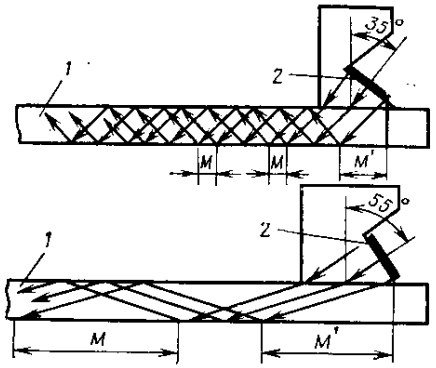


Рис. 6.19. Схема хода поперечных волн в стенке *1* трубы, возбуждаемых наклонными искателями *2* с углами падения 35 и 55°

поверхности искателя и длиной части развертки $L'_б$ у начального сигнала (рис. 6.20), на которой возникают неустранимые сигналы-помехи от возвратившихся на пьезопластину УЗК после

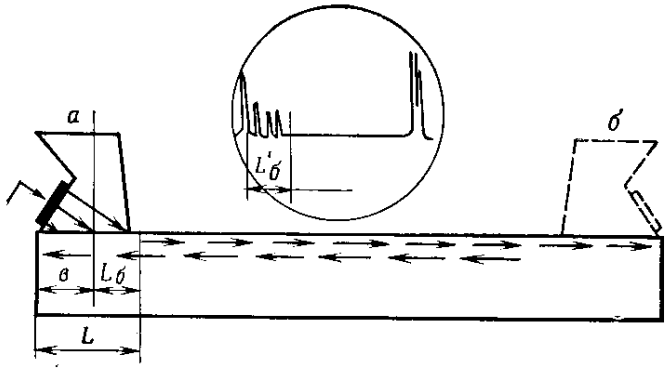


Рис. 6.20. Суммарная мертвая зона L при контроле поверхностной волной, непрозвучиваемый участок $в$, находящийся под призмой искателя, и временна́я мертвая зона искателя $L_б$

многократных отражений их в призме искателя. При использовании нормальных волн размер L может достигать 100—120 мм. Уменьшить размер L в этом случае можно прозвучиванием детали в двух противоположных направлениях и применением искателей с меньшей контактной поверхностью.

§ 6.9. Типовая методика ультразвукового контроля деталей

От правильного выбора методики ультразвукового контроля зависит его эффективность (из-за специфичности метода ультразвуковой дефектоскопии). Методики разрабатывают, как правило, для контроля одной детали или группы деталей. Перед разработкой методики изучают, а в процессе разработки учитывают основные дефектоскопические характеристики детали (см. рис. 8.1). При выборе параметров ультразвукового контроля более подробно рассматривают возможные зоны ввода УЗК, положение вероятных дефектов относительно этих зон, акустические свойства материала детали (скорость распространения УЗК, акустическое сопротивление, коэффициент затухания УЗК, уровень структурной реверберации), возможные акустические препятствия на пути распространения ультразвука. Учитывают также технологию изготовления детали, узла, ТУ на отбраковку и условия работы детали в эксплуатации.

Как правило, в методике указывают:

— технические условия (ТУ) на отбраковку;

— зоны контроля, типы используемых волн и искателей, направления прозвучивания, места установки искателей, углы ввода УЗК и схемы перемещения (сканирования) искателей при поиске дефектов;

— оптимальные значения рабочих параметров дефектоскопа (частоту УЗК, мощность зондирующих импульсов и частоту их следования), режим работы (без задержки или с задержкой развертки);

— контрольный образец с искусственными или натуральными дефектами (отражателями УЗК) и порядок настройки дефектоскопа на заданную чувствительность и дальность прозвучивания;

— демонтажные работы на самолете для обеспечения доступности зоны контроля;

— подготовку поверхности контролируемой детали и обеспечение акустического контакта;

— порядок контроля;

— расшифровку показаний дефектоскопа, определение характера и размеров дефектов;

— меры по технике безопасности при работе непосредственно на самолете.

Выбор типа ультразвуковых волн, зон и угла ввода волн и направлений прозвучивания. Для обнаружения в деталях сложной формы внутренних дефектов, расположенных под углом к поверхности ввода УЗК, применяют поперечные волны, а дефектов, расположенных на поверхности детали (трещин усталости, коррозионных и механических повреждений и др.), — поверхностные или поперечные волны, которые вводят в металл наклонными искателями. Поверхностные и поперечные волны по сравнению с

продольными позволяют обнаруживать более мелкие дефекты при одной и той же частоте.

Поперечные волны широко используют для контроля сварных соединений, цилиндров, деталей шасси и др. При выборе угла ввода УЗК при контроле сварных стыковых швов исходят из того,

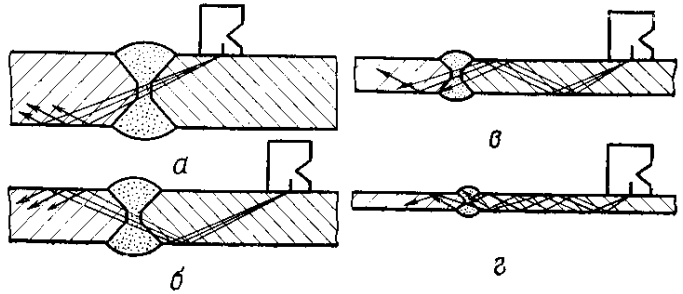


Рис. 6.21. Способы контроля сварного шва различной толщины ультразвуковым лучом:

а — прямым; *б* — однократно отраженным; *в* — двукратно отраженным; *г* — многократно отраженным

чтобы расстояние от искателя до шва было как можно меньшим. Поэтому швы толщиной 20—40 мм и более прозвучивают прямым или однократно отраженным лучом (рис. 6.21, *а*, *б*), применяя искатель с углом наклона 40°, а швы толщиной 8—20 мм — двукратно и трехкратно отраженным лучом, применяя искатель с углом наклона 50, 53 и 55° (рис. 6.21, *в*, *г*).

Поверхностные волны предпочтительнее для контроля деталей сложной конфигурации, так как они могут огибать, не отражаясь, вогнутые и выпуклые участки детали радиусом скругления $2\lambda_{пов}$ и более.

Нормальные волны применяют в случаях, когда необходимо обнаружить поверхностные и внутренние дефекты (расслоения, закаты, пористость, поверхностные трещины и др.) в тонких деталях постоянной толщины (в трубопроводах, листах, оболочках толщиной, соизмеримой с длиной волны). Детали с алюминиевым покрытием, нанесенным способом металлизации распылением, нельзя проверять поверхностными и нормальными волнами из-за сильного затухания этих волн в изделиях с повышенной шероховатостью поверхности.

Продольные волны применяют для контроля деталей большой толщины на наличие внутренних дефектов (раковин, расслоений, зон пористости и т. д.).

Во всех случаях направления прозвучивания и места установки искателей выбирают так, чтобы осевой луч падал на поверхность предполагаемого дефекта под углом, близким к прямому. При этом определяют, какие возможные сигналы-помехи могут возникнуть от выточек, острых углов, граней, канавок, вспучившегося лакокрасочного покрытия и т. д. При контроле деталей сложной формы применяют ограничители, позволяющие

устанавливать искатель в определенном положении, при котором обеспечивается прозвучивание критических участков детали (рис. 6.22).

Для обеспечения контроля всего изделия искатель перемещают по его поверхности с шагом не более диаметра пьезопластины.

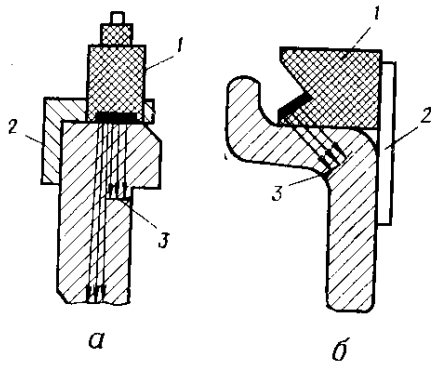


Рис. 6.22. Положение прямого (*а*) и наклонного (*б*) искателей при ультразвуковом контроле барабанов и реборд авиационных колес:

1 — искатель; *2* — ограничитель; *3* — трещина

Зоны контроля, места установки искателей, направления прозвучивания, схемы сканирования искателей намечают на эскизе проверяемой детали.

Выбор оптимальных рабочих параметров дефектоскопа. С повышением частоты УЗК и мощности зондирующих импульсов растет чувствительность метода. Однако высокочастотные колебания трудно вводить в металл, они быстро затухают, и дальность прозвучивания уменьшается.

Оптимальную частоту УЗК выбирают в зависимости от зернистости материала детали (уровня структурных помех), размеров контролируемой зоны детали, а мощность импульсов, кроме того, — и от самой частоты УЗК. Стальные детали толщиной до 1 м, сварные швы толщиной до 8—40 мм прозвучивают на частоте 2,5 МГц; тонкие сварные швы (до 8 мм) — на частоте 5 МГц. Контроль деталей из крупнозернистых материалов с большим коэффициентом затухания ультразвука проводят на частотах 1,25 МГц и меньше.

На практике частоту УЗК и мощность импульсов, а также другие параметры режима работы дефектоскопа для надежного обнаружения дефектов заданного размера подбирают обычно экспериментально в период разработки методики.

Подготовка поверхности контролируемой детали и обеспечение акустического контакта. Перед проведением контроля поверхность детали в зоне контроля очищают от грязи, отслаивающегося лакокрасочного покрытия, окалины, продуктов коррозии и т. д., чтобы улучшить условия прохождения волн и устранить возможные случаи появления сигналов-помех.

Контактную смазку для обеспечения акустического контакта между искателем и поверхностью детали выбирают, исходя из чистоты обработки, формы и ориентации поверхности относительно силы тяжести в месте установки искателя, а также в зависимости от температуры окружающего воздуха.

При контроле авиационных деталей с гладкой поверхностью (▽ 6) в качестве контактной смазки применяют:

— при температуре 20° С и выше — масло МК-22;

— при температуре от 10 до 20° С — смесь масел (по объему): 50% масла МК-22 и 50% масла МК-8;

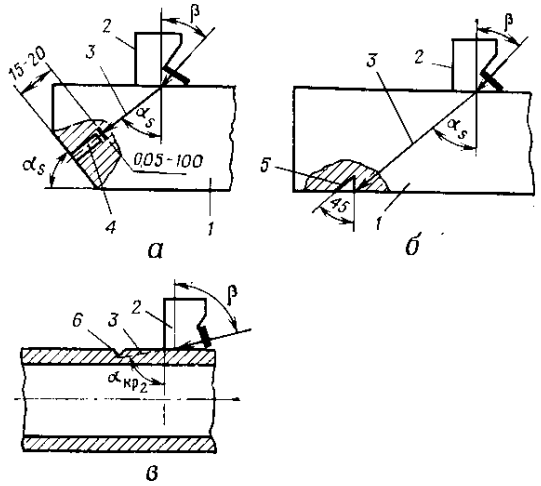


Рис. 6.23. Контрольные образцы с отражателями в виде отверстия с плоским дном (*а*), угловым отражателем (*б*) и с риской (*в*):

1 — образец; *2* — искатель; *3* — осевой ультразвуковой луч; *4* — отверстие с плоским дном; *5* — угловой отражатель; *6* — риска треугольной формы; β и α — углы падения и ввода ультразвукового луча

— при температуре ниже 10° С — масло МК-8.

Для смазки грубых и вертикальных поверхностей используют более вязкие масла — компрессорное, смазку ЦИАТИМ-201 и др.

Качество акустического контакта проверяют по амплитуде концевого эхо-сигнала.

Настройка дефектоскопа на заданную чувствительность. Ее проводят по контрольным образцам, имеющим согласно ГОСТ 14782—75 и ГОСТ 17410—72 специальные контрольные отражатели (искусственные дефекты): отверстие с плоским дном, угловой или сегментный отражатель, глубокую риску, надрез и др. (рис. 6.23). Материал, форма, чистота обработки поверхности образца должны быть такими, как у контролируемой детали. В качестве контрольного образца часто применяют деталь или ее часть, на поверхности которой в месте возможной трещины выполнен искусственный отражатель заданных размеров.

Контрольные образцы с отражателями в виде отверстия с плоским дном или с угловым и сегментным отражателями рекомендуются для настройки дефектоскопов при контроле деталей поперечными и продольными волнами, а образцы с отражателями

в виде надрезов и рисок — при контроле поверхностными и нормальными волнами.

Настройка чувствительности дефектоскопа по контрольному образцу сводится к следующему. На поверхность образца в месте установки искателя наносят тонкий слой контактной смазки. Искатель устанавливают так, чтобы его осевой луч был направлен на отражатель. Регулируя чувствительность дефектоскопа, устанавливают амплитуду эхо-сигнала от контрольного отражателя 30—40 мм. При установленной чувствительности производится контроль деталей. В ряде случаев поиск дефектов производят при несколько повышенной чувствительности по сравнению с установленной, так как выявляемость реальных дефектов из-за диффузного рассеяния ими УЗК (см. рис. 6.5) несколько хуже выявляемости искусственных. Кроме настройки чувствительности, контрольные образцы иногда применяют для точного определения расстояния до дефекта по расположению импульсов на экране дефектоскопа. На контрольных образцах отрабатывают приемы проверки конкретных деталей и приобретают начальный опыт ультразвукового контроля.

Для измерения основных параметров контроля служат стандартные эталоны № 1—3 (ГОСТ 14782—75). Эталон № 1 из органического стекла с боковыми отверстиями на различной глубине применяют для определения условной чувствительности*, проверки разрешающей способности, точности работы глубиномера дефектоскопа и угла наклона призмы искателя.

Эталон № 2 из материала контролируемой детали с двумя боковыми отверстиями и специальной шкалой применяют для определения угла ввода ультразвукового луча и проверки мертвой зоны дефектоскопа с искателем.

Эталон № 3 из малоуглеродистой стали, имеющий форму полукольца, применяют для определения точки выхода осевого луча из призмы искателя. Эту точку используют при определении протяженности и координат залегания выявленного дефекта.

Расшифровка показаний дефектоскопа, определение характера и размеров дефектов. Показания ультразвуковых дефектоскопов — это осциллограммы. На них, кроме полезных сигналов — начального, от дефектов и концевого, могут быть сигналы-помехи, возникающие из-за неисправности искателя, от неоднородностей структуры металла (реверберационные помехи), от сложного рельефа поверхности детали, нарушений (вспучивания, шелушения) лакокрасочного покрытия, наличия окалины, грязи, капель масла и т. д. При расшифровке осциллограмм необходимо отличить полезные сигналы от сигналов-помех и дать заключение о пригодности детали к дальнейшей эксплуатации.

---

* Условную чувствительность, измеряемую по эталону № 1, выражают наибольшей глубиной расположения цилиндрического отражателя, уверенно фиксируемого индикаторами дефектоскопа.

Наличие концевого и начального сигналов свидетельствует о хорошем акустическом контакте и исправности аппаратуры. Отсутствие ожидаемого концевого эхо-сигнала может быть вызвано плохим акустическим контактом, наличием крупного дефекта, отражающего всю энергию УЗК, или межкристаллитной коррозией и крупнозернистой структурой, рассеивающими УЗК. При контроле поверхностными, нормальными и поперечными волнами некоторых деталей, например длинных штоков, цилиндров и др., длина которых больше дальности прозвучивания дефектоскопа, концевого эхо-сигнала в общем не существует. Это требует особого внимания дефектоскописта, периодической проверки надежности акустического контакта.

В случае прозвучивания цилиндрических деталей по окружности на экране возникает эхо-сигнал, который при перемещении искателя не изменяет своего положения. Появление этого сигнала свидетельствует о том, что УЗК прошли по всей окружности. Такой сигнал можно рассматривать как своеобразный концевой. Пропадание этого сигнала и появление промежуточного может быть признаком наличия крупного дефекта. При перемещении в этом случае искателя вперед по окружности промежуточный эхо-сигнал на экране перемещается в левую сторону.

При возникновении на экране нескольких концевых эхо-сигналов из-за многократного отражения ультразвука от конца детали (в случае контроля короткой детали при большой дальности прозвучивания дефектоскопа) длину развертки устанавливают так, чтобы на экране ЭЛТ наблюдались только начальный и первый концевой эхо-сигналы.

Сигналы-помехи из-за неисправности искателя легко отличить, так как они сохраняются на экране в одном и том же месте при передвижении искателя по поверхности детали и после снятия его с детали. Сигналы-помехи, возникающие от неоднородностей структуры, в ряде случаев невозможно отличить от полезных. Для облегчения расшифровки осциллограмм с реверберационными помехами рекомендуется детали из крупнозернистых материалов прозвучивать при пониженных рабочей частоте УЗК, мощности зондирующего импульса и усилении дефектоскопа.

При контроле деталей сложной конфигурации определяют места, дающие на экране сигналы-помехи (грани, канавки, выточки и другие конструктивные элементы — отражатели ультразвука). Так, например, зона прессового соединения обоймы подшипника с осью при контроле оси может вызывать помехи в виде широкого эхо-сигнала (из-за отражения и трансформации УЗК на границе соединения). В отдельных случаях проводят контроль, фиксируя на экране указанные сигналы-помехи от конструктивных отражателей. Увеличение амплитуды какого-либо сигнала-помехи может быть признаком наличия дефекта, эхо-сигнал от которого сливается с сигналом-помехой.

При поиске трещин усталости, зона возникновения которых на поверхности детали известна, удобно пользоваться стробом-импульсом и дополнительной автоматической звуковой или световой индикацией дефектов, позволяющими рассматривать на экране ЭЛТ только контролируемую зону и эхо-сигналы от трещин, расположенных в этой зоне. В этом случае значительно облегчается расшифровка осциллограмм, так как из рассмотрения исключаются участки развертки, на которых возможно возникновение большого количества мешающих расшифровке сигналов, отраженных от неровностей поверхности (например, чешуйчатости сварного шва, наличие проплавов и т. д.), а также от различных уступов, граней и выточек, находящихся ближе и дальше выделенной зоны контроля. При наличии в контролируемой зоне трещин срабатывает автоматическая сигнализация, настроенная на определенную (заданную) чувствительность.

О размерах дефектов можно судить по амплитуде эхо-сигналов, измерение которых производят аттенюатором.

Условную протяженность дефекта измеряют длиной зоны перемещения искателя по поверхности детали, например вдоль сварного шва, в пределах которой наблюдается эхо-сигнал от выявляемого дефекта при заданной чувствительности дефектоскопа. Ошибка в измерении условной протяженности дефекта может достигать 8—12 мм и более. Для большей точности измерения вносят поправку, которую определяют измерением условной длины пропила на контрольном образце. Условную протяженность менее 5 мм не измеряют.

Местоположение дефекта при контроле поверхностными и нормальными волнами ориентировочно можно определить двумя способами:

1. Путем демпфирования распространяющихся УЗК — прижатием к контролируемой поверхности материала, хорошо поглощающего УЗК (резины или пальца, смоченного маслом). Если это нажатие произойдет между искателем и дефектом, то эхо-сигнал на экране дефектоскопа уменьшится по высоте или исчезнет, а если за дефектом, то он не изменится. Сближая точки нажатия, находят местоположение дефекта.

2. Перемещением искателя. При положении искателя над дефектом последний на экране не фиксируется. Для точного определения координат выявленного дефекта пользуются графиком глубиномера для поверхностных или нормальных волн.

Меры предосторожности и техника безопасности. При проведении контроля в аэродромных условиях **запрещается** работать с дефектоскопом без его заземления; снимать кожух, а также работать со снятым кожухом, так как на электроды ЭЛТ подается высокое напряжение, опасное для жизни. При работе непосредственно на самолете стремянка должна иметь ограждение. К работе с дефектоскопом допускаются специалисты, прошедшие

инструктаж и сдавшие зачет по знанию методики контроля и правил техники безопасности.

Ошибки в применении ультразвуковых дефектоскопов. При ультразвуковом контроле иногда допускают ошибки, снижающие его эффективность. Вот некоторые из них.

Контроль проводят с применением неисправных дефектоскопов и искателей, дающих большие помехи, или дефектоскопов, имеющих пониженные чувствительность и дальность прозвучивания, вследствие чего проверяется не вся поверхность деталей, например, не проверяется поверхность кожухов камер сгорания, и не выявляются опасные дефекты.

Для настройки дефектоскопов применяют контрольные образцы с бо́льшими, чем оговорены в методике, контрольными отражателями, и дефектоскопы работают от источников питания с пониженным напряжением, вследствие чего сильно загрубляется чувствительность дефектоскопа.

В процессе контроля не следят за правильностью установки искателя, не знают, в каком месте экрана ЭЛТ должен возникать концевой эхо-сигнал, так как на нем такое место не отмечают.

Проводят контроль при сильной освещенности, затрудняющей наблюдение за осциллограммами.

Невнимательно наблюдают за экраном дефектоскопа; неправильно расшифровывают результаты контроля. Например, имелись случаи, когда эхо-сигналы от крупной трещины, расположенной у конца пера лопатки, принимали за концевые.

В ряде случаев не выясняют причин возникновения эхо-сигналов и производят браковку по ложным сигналам.

§ 6.10. Контроль некоторых деталей авиационной техники

В эксплуатации ультразвуковому контролю подвергают разнообразные по форме и различные по размерам и материалам детали авиационной техники. Каждую деталь проверяют по специальной методике, отличающейся от других типом волны и рабочей частотой УЗК, размерами и формой искателей, способами ввода УЗК в зону контроля, способами настройки дефектоскопов, расшифровкой результатов контроля и т. д. Рассмотрим несколько таких методик.

Контроль лопаток роторов турбин и компрессоров. Зонами ультразвукового контроля лопаток в эксплуатации являются входная и выходная кромки, за исключением мертвых зон у замка и конца пера лопатки — ближней длиной 25—30 мм и дальней 5—7 мм. Лопатки последних ступеней турбин контролируют в реактивной трубе на расстыкованном самолете, а лопатки компрессоров — через специальные окна. Применяют дефектоскопы УЗДЛ-61-2М или УДМ-1М (УДМ-3) и искатели типа АИГ, возбуждающие в кромках поверхностные волны.

Настройку чувствительности дефектоскопа и длины развертки проводят по контрольным образцам, представляющим собой

лопатки контролируемой ступени ротора турбины или компрессора с контрольным отражателем в виде поперечного надреза на кромке глубиной 0,3 мм и шириной раскрытия около 0,1 мм. Места расположения надрезов выбирают в зависимости от длины лопатки на расстоянии от 10 до 30—60 мм от конца пера.

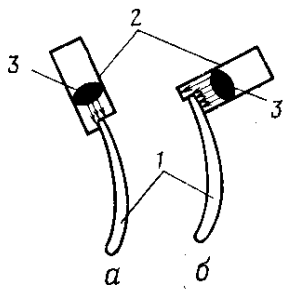


Рис. 6.24. Положение искателя с Г-образной контактной поверхностью на кромке лопатки:

а — правильное; *б* — неправильное; *1* — лопатка; *2* — искатель; *3* — пьезопластина

При контроле искатель прикладывают к кромке у замка или на конце пера лопатки так, чтобы Г-образная контактная поверхность его соприкасалась по радиусу скругления кромки, а уступ Г-образной поверхности был обращен к корыту пера (рис. 6.24, *а*). Такое расположение искателя обеспечивает ввод в кромку максимальной энергии УЗК.

Типичные осциллограммы, возникающие на экране дефектоскопа при контроле лопаток, приведены на рис. 6.25. Возникновение только начального сигнала *1* и концевого *2* (рис. 6.25, *а*) свидетельствует о хорошем акустическом контакте и отсутствии на кромке дефектов, способных отражать УЗК. Возникновение концевого *2* и промежуточного *3* эхо-сигналов (рис. 6.25, *б*) свидетельствует о наличии дефекта небольшой глубины (например, трещины глубиной до 1—1,5 мм или забоины), отразившего часть энергии УЗК, а возникновение только промежуточного интенсивного эхо-сигнала *3* и отсутствие концевого (рис. 6.25, *в*) — о наличии крупной трещины (глубиной более 1,5 мм), полностью отражающей УЗК. Причинами появления нескольких промежуточных сигналов, отличающихся по амплитуде (рис. 6.25, *г*), могут быть: мелкие трещины (растрескивания по границам зерен), эрозионно-коррозионные поражения, механические повреждения кромки или неоднородность структуры материала. Чтобы определить, являются ли выявленные дефекты поверхностными или внутренними, лопатки, дающие такого вида осциллограммы, подвергают цветному и оптико-визуальному контролю. Если при контроле лопаток на экране наблюдают только начальный сигнал, а концевого и промежуточных нет, то это свидетельствует о плохом акустическом контакте. Акустического контакта добиваются путем нанесения контактной смазки и перемещения искателя на 3—5 мм от места ввода вдоль кромки и поворота ее влево-вправо на 5—10°. Такое перемещение искателя позволяет устранить возможный перекос его из-за вогнутости кромки в месте перехода к замку.

Появление на экране слабого концевого сигнала или его отсутствие при хорошем акустическом контакте является признаком крупнозернистости материала лопатки, рассеивающего УЗК.

Такие лопатки называют **непрозвучиваемыми**. Некоторые из них можно проверить ультразвуком более низкой частоты, но при этом понижается чувствительность. Непрозвучиваемые эмалированные лопатки проверяют токовихревым методом, а неэмалированные и хромоалитированные — цветным.

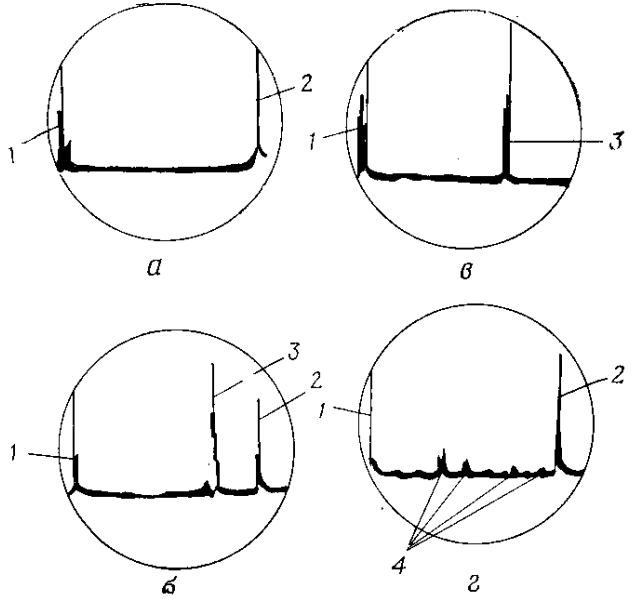


Рис. 6.25. Типичные осциллограммы, возникающие на экране дефектоскопа при контроле лопаток:

а — при отсутствии дефектов в материале лопатки; *б* — при наличии дефекта небольшой глубины (до 1—1,5 мм); *в* — при наличии крупного дефекта; *г* — при наличии нескольких мелких дефектов; *1* — начальный сигнал; *2* — концевой сигнал; *3* и *4* — промежуточные сигналы

Кроме эхо-сигналов от указанных дефектов, на экране дефектоскопа у начального импульса на участке развертки 15—30 мм (в зависимости от длины лопатки) иногда возникают сигналы-помехи, обусловленные отражением УЗК от призмы искателя. Этот участок характеризует мертвую зону дефектоскопа с данным искателем.

Помехи могут возникать от неисправностей искателя (замасливание демпфера, разрушение пьезопластины и др.). Чтобы отличить сигналы-помехи от сигналов, отраженных от дефектов, искатель перемещают вдоль кромки на 10—15 мм. При этом эхо-сигналы от дефектов будут перемещаться по экрану, а сигналы-помехи — оставаться на прежнем месте.

Ультразвуковым методом на кромках лопаток выявляют трещины усталости и ползучести (открытые или находящиеся под слоем эмали), механические и эрозионно-коррозионные поражения (мелкие забоины с острыми краями, коррозионные язвины,

раковины, рис. 6.26, *а*) и внутренние дефекты (разнозернистость структуры материала, неметаллические включения, рис. 6.26, *б*).

Контроль цельноштампованных кожухов камер сгорания. Ультразвуковому контролю подвергают конусную часть кожуха

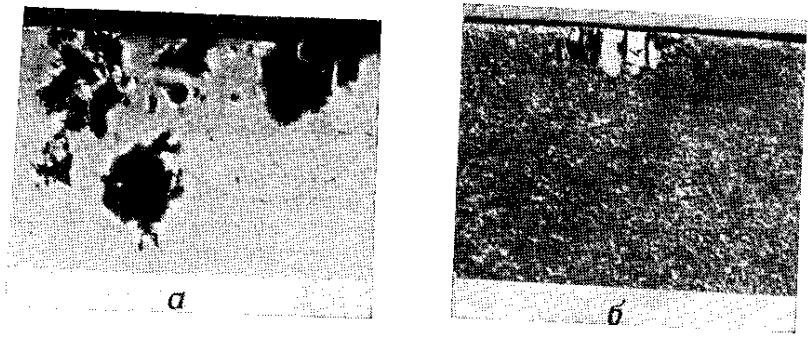


Рис. 6.26. Эрозионно-коррозионные поражения кромки лопатки компрессора (*а*) и разнозернистость структуры материала кромки лопатки турбины (*б*), выявленные ультразвуковым методом (120-кратное увеличение)

длиной 250 мм от сварного шва. Применяют дефектоскоп УЗДЛ-61-2М и искатель АИГ-3 с плоской контактной поверхностью, возбуждающий в оболочке кожуха нормальные волны. Дефектоскоп настраивают по контрольному образцу, представляющему собой кожух, на наружной поверхности которого вдоль образующей нанесена риска глубиной 0,1 мм, длиной 60—80 мм.

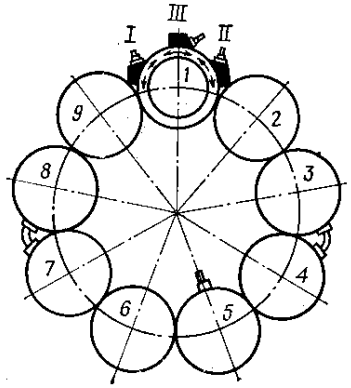


Рис. 6.27. Места ввода УЗК в стенку кожуха (I, II и III) и направления прозвучивания кожухов камер сгорания на двигателе

Прозвучивание оболочки кожуха на двигателе проводят по частям из трех положений искателя (рис. 6.27), направляя нормальные волны по окружности кожуха. Из положения III прозвучивают места I и II, откуда производился контроль открытой и закрытой части кожуха. При поиске дефектов искатель *3* (рис. 6.28) медленно передвигают по слою масла вдоль образующей, одновременно поворачивая его на 5—10° и слегка наклоняя вперед и назад. Если в контролируемом участке кожуха *1* нет дефектов, то на экране будут наблюдаться только начальный сигнал *1* (рис. 6.29, *а*) и сигналы-помехи *2*. Последние возникают от масляной прослойки между искателем и поверхностью кожуха. Они постоянно появляются на

участке развертки длиной до 25 мм. Соответствующий участок кожуха является мертвой зоной. При наличии дефекта в контролируемой зоне кожуха на экране возникает от него эхо-сигнал *3* (рис. 6.29, *б*), отличающийся от эхо-сигналов от дефектов на кром-

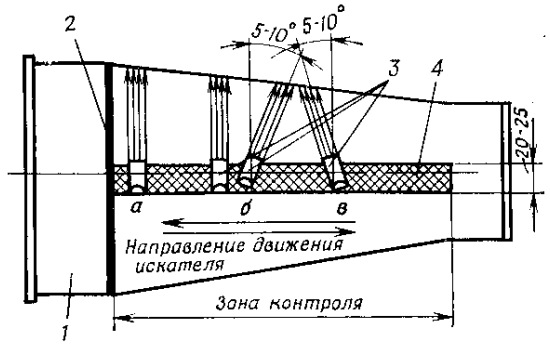


Рис. 6.28. Положения искателя при ультразвуковом контроле кожуха:

1 — кожух; *2* — сварной шов; *3* — искатель (его положение при поиске дефектов); *4* — слой минерального масла

ках лопаток значительно большей шириной. Так как концевого сигнала нет (дальность прозвучивания дефектоскопа меньше длины окружности), то при поиске дефектов особое внимание об-

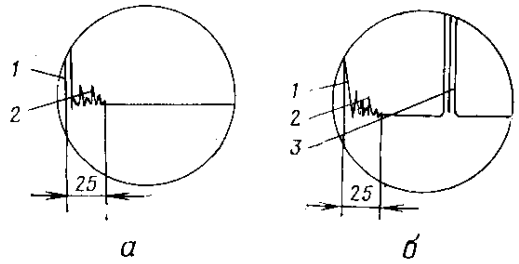


Рис. 6.29. Типичные осциллограммы контроля кожухов камер сгорания:

а — при отсутствии дефектов в материале кожуха; *б* — при наличии протяженного дефекта; *1* — начальный сигнал; *2* — сигналы-помехи; *3* — эхо-сигнал от дефекта

ращают на обеспечение акустического контакта. Проверку последнего проводят, периодически направляя УЗК в сторону сварного шва *2* (рис. 6.28). При хорошем контакте на экране дефектоскопа появляется эхо-сигнал от шва.

В процессе поиска дефектов возникают сигналы-помехи от дренажных штуцеров или от случайно оставшегося масла, которые нужно иметь в виду при расшифровке осциллограмм.

Приближенно длину протяженного дефекта определяют передвижением искателя вдоль образующей. За начало и конец отсчета длины принимают точки ввода центрального луча, в которых амплитуда эхо-сигналов от дефекта составляет 10 мм.

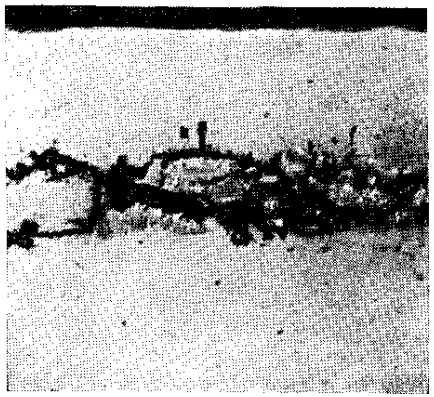


Рис. 6.30. Расслоение, выявленное ультразвуковым методом, в материале кожуха камеры сгорания (115-кратное увеличение)

Ультразвуковым методом в материале кожуха выявляют следующие поверхностные и внутренние дефекты, распространяющиеся вдоль его образующей: расслоения (рис. 6.30), закаты, неметаллические включения, волосовины, трещины и риски глубиной 0,05 мм и более.

Контроль диска ротора компрессора. Контролю подвергают зону *1* (рис. 6.31) перехода от полотна диска к ступичной части со стороны кока двигателя с целью выявления трещин. Контроль проводят при снятом коке дефектоскопом УЗДЛ-61-2М. Применяют искатель *2*, возбуждающий в материале диска поверхностные УЗК частотой 2,5 МГц. Направление прозвучивания — по радиусу от обода диска к ступице. Для сохранения неизменного положения оси искателя относительно радиуса диска на искателе имеются фиксирующие упоры *3*. При поиске трещин этими упорами искатель поджимают к стенке у перехода полотна к ободу диска. Настройку чувствительности дефектоскопа проводят по контрольному отражателю в виде надреза, выполненного на образце из диска в месте вероятного возникновения трещин. Амплитуду эхо-сигнала от контрольного отражателя устанавливают 30 мм, на шкале экрана отмечают положение этого сигнала и по обе стороны отметки на расстоянии 3 мм красным карандашом наносят два штриха *4*.

Контроль проводят, медленно передвигая искатель по слою контактной смазки, нанесенной на полотно диска у стенки обода. Акустический контакт проверяют по амплитуде концевого эхо-сигнала *5*. Возникновение эхо-сигнала *6* между нанесенными штрихами свидетельствует о наличии трещины в диске.

Контроль сварных швов рам. Целью контроля является обнаружение трещин и других дефектов в стыковом сварном шве рам толщиной 25—28 мм при доступе с наружной стороны рамы, где шов зачищен. Для контроля применяют дефектоскопы ДУК-66П или УДМ-3 (УДМ-1М), которые позволяют исключить влияние мешающих факторов (проплавов в корне шва и неровностей на закрытой поверхности рамы). Поиск дефектов осуществляют наклонными искателями с углом падения 40° на частоте 2,5 МГц и двух уровнях чувствительности — поисковой и отбраковочной (отборочной).

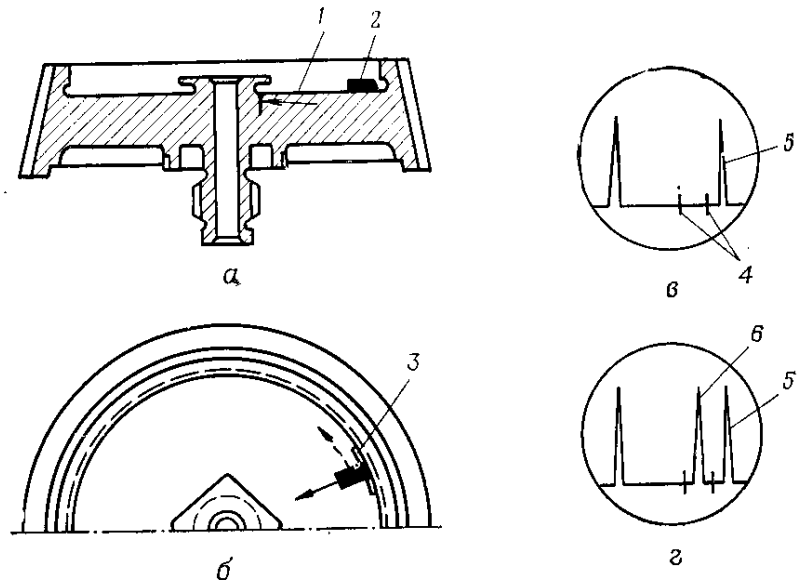


Рис. 6.31. Расположение искателя (*а*), схема сканирования искателя (*б*) и осциллограммы (*в* и *г*) при ультразвуковом контроле диска ротора компрессора:

1 — зона контроля; *2* — искатель; *3* — упор; *4* — штрихи; *5* и *6* — эхо-сигналы

Настройку дефектоскопов на поисковую и отбраковочную чувствительность производят по стандартному контрольному образцу из органического стекла № 1 (ГОСТ 14782—75), а установку длительности строба-импульса — по образцу, изготовленному из материала контролируемой детали.

Дефектоскоп считается настроенным на отбраковочную чувствительность, если амплитуда эхо-сигнала от отверстия в стандартном образце № 1 на глубине 25 мм составляет 30 мм (ДУК-66П) или 40 мм (УДМ-1М, УДМ-3), и настроенным на поисковую чувствительность, если амплитуда эхо-сигнала имеет такие же значения, но на глубине 35 мм от отверстия.

Длительность строба-импульса устанавливают соответствующую прозвучиваемой толщине шва — 28 или 25 мм (если мешающие факторы отсутствуют) или толщине 24 и 21 мм (при наличии неудаленного проплава в корне шва). Прозвучивание проводят прямым лучом (см. рис. 6.21, *а*) с обеих сторон шва. При передвижении искатель поворачивают на ±10° относительно его вертикальной оси.

Во время контроля следят за обеспечением акустического контакта, так как концевой эхо-сигнал отсутствует. При наличии в

материале шва трещины *3* (рис. 6.32, *б*) на экране в области строба-импульса *6* возникает эхо-сигнал *7* от дефекта. Шов бракуют, если амплитуда эхо-сигналов от дефектов превышает 40 мм при настройке на отбраковочную чувствительность. Такая методика

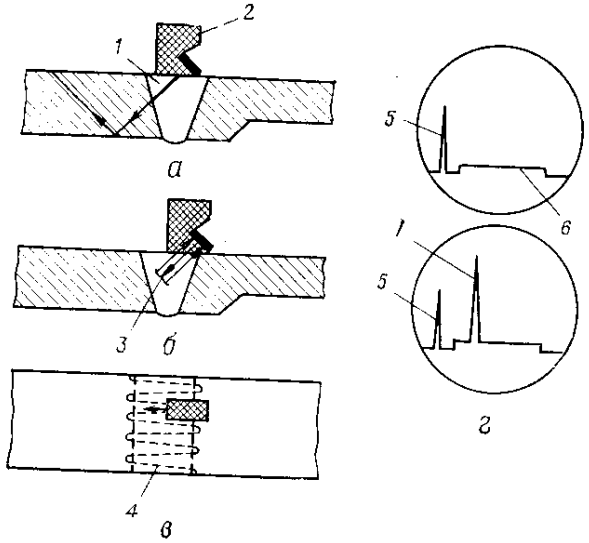


Рис. 6.32. Расположение искателя (*а* и *б*); схема сканирования искателя (*в*) и осциллограммы (*г*) при контроле сварных швов рам:

1 — сварной шов; *2* — искатель; *3* — дефект; *4* — траектория сканирования искателя; *5* — начальный сигнал; *6* — строб-импульс; *7* — эхо-сигнал от дефекта

ультразвукового контроля обеспечивает выявление трещин в сварных швах площадью 2 мм² с раскрытием не менее 0,05 мм.

Контроль осей поворотных узлов проводят с целью обнаружения трещин в слое основного металла, расположенном на расстоянии от 20 до 65 мм от торца оси (рис. 6.33, *а*). Применяют дефектоскоп ДУК-66П и прямой искатель, работающий по совмещенной схеме включения. Продольные волны вводят со стороны торцов оси (рис. 6.33, *б*). При ширине наружного пояса $\geqslant 12$ мм применяют искатель с частотой 2,5 МГц, а при ширине пояса <12 мм — искатель с частотой 5 МГц.

Длительность строба-импульса, соответствующую прозвучиваемому слою металла толщиной 45 мм, устанавливают по металлическому контрольному образцу, а настройку дефектоскопа на отбраковочную чувствительность — по стандартному образцу № 1 (ГОСТ 14782—75). При этом чувствительность устанавливают такую, чтобы амплитуда эхо-сигнала от контрольного отражателя, расположенного на глубине 35 мм при контроле на частоте

2,5 МГц, и от отражателя, расположенного на глубине 20 мм при контроле на частоте 5МГц, составляла 30±2 мм.

Перед контролем торцы оси протирают насухо. Контактную смазку ЦИАТИМ-201 наносят кистью на всю поверхность торца и последовательно прозвучивают один участок за другим, сканируя искатель с шагом $l=5$ мм. Таким путем оси прозвучивают с обоих торцов. В целях облегчения поиска трещин чувствительность дефектоскопа несколько увеличивают по сравнению с настроенной отбраковочной чувствительностью уменьшением ослабления на 10 дБ с помощью ручки ОСЛАБЛЕНИЕ. При появлении на экране в зоне строба-импульса эхо-сигнала на торце оси отмечают место положения искателя, дефектоскоп настраивают на отбраковочную чувствительность и повторно проверяют данный участок оси. Если на экране возникает эхо-сигнал амплитудой 30 мм и более, измеряют условную протяженность h и глубину залегания дефекта. Условную протяженность дефекта определяют по перемещению искателя вдоль пояса торца оси. За крайние положения искателя принимают такие, при которых амплитуда эхо-сигнала от трещины достигает 20 мм. Характер трещины, обнаруженной ультразвуковым методом в материале оси, показан на рис. 6.34.

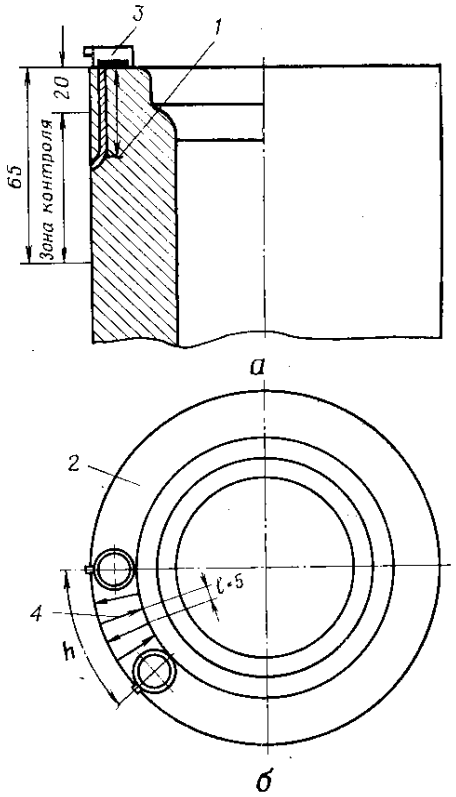


Рис. 6.33. Зона контроля (*а*) и схема сканирования искателя (*б*) при ультразвуковом контроле осей поворотных узлов:

1 — трещина; *2* — поверхность ввода УЗК (торец оси); *3* — искатель; *4* — траектория сканирования искателя; *l* — шаг сканирования; *h* — условная протяженность трещины

Контроль клеевых соединений обшивки с сотовым заполнителем (интерцептора, закрылков, руля поворота, крыльевых прижимных щитков, лопастей несущего винта и других деталей) проводят импедансным акустическим дефектоскопом ИАД-3 или ИАД-2. Рассмотрим методику контроля в амплитудном варианте импедансного метода.

В качестве контрольных образцов для настройки дефектоскопов используют части контролируемых деталей с искусственными или с естественными дефектами в виде непроклея размером от 0,5 $D_{доп}$ и более ($D_{доп}$ — максимальная протяженность дефекта, допустимого согласно ТУ на отбраковку).

Рис. 6.34. Внутренняя трещина в материале оси, выявленная ультразвуковым методом (5-кратное увеличение)

Используются два основных режима контроля: резонансный и нерезонансный. Резонансный режим применяют при контроле конструкции с толстой (для алюминиевого сплава свыше 0,7—0,8 мм) металлической обшивкой и жестким внутренним элементом (лонжероном, нервюрой, стрингером и др.). Контроль сотовых панелей с обшивками из алюминиевого сплава до 0,7—0,8 мм, изделий с металлической обшивкой и пенопластовым заполнителем и др. проводят в нерезонансном режиме. При настройке выбирают режим, дающий минимальный разброс показаний дефектоскопа на контрольном образце.

Настройку дефектоскопа ИАД-3 на нерезонансный режим проводят в следующем порядке. Все ручки прибора устанавливают в исходные положения согласно инструкции по его эксплуатации; тумблер ФАЗА переводят в нижнее положение. Рабочую частоту устанавливают ручкой ЧАСТОТА, выбирая ее в зависимости от жесткости изделия. Для контроля сотовых панелей с тонкой обшивкой (для алюминиевого сплава — до 0,4 мм) и крупной ячейкой сот (сторона 5—6 мм) следует применять частоты 1—1,2 кГц, а для контроля изделий с обшивкой толщиной 0,4—0,8 мм — 2—3,5 кГц. Датчик ДИ-1 (длинный) или ДИ-2 (короткий) хорошо прижимают к обшивке контрольного образца (см. рис. 6.8, *а*) и с помощью ручек МОЩНОСТЬ и УСИЛЕНИЕ добиваются, чтобы при перемещении датчика в этой зоне минимальное отклонение стрелки было в пределах 80—90% всей шкалы амплитудного индикатора *А*. Затем датчик передвигают по поверхности контрольного образца в зону с дефектом. При правильной настройке прибора должна отклониться его стрелка влево и загореться красная сигнальная лампочка. До начала контроля детали следует убедиться, что все дефекты в контрольном образце выявляются хорошо. В процессе настройки и контроля допускается отклонение стрелки индикатора *А* дефектоскопа за пределы шкалы.

Контроль проводят, перемещая датчик по поверхности контро-

лируемой детали (рис. 6.35) и одновременно наблюдая за сигнальной лампочкой, находящейся в датчике. Перемещать датчик необходимо с легким нажимом со скоростью не более 1,5 м/с, удерживая его по нормали к поверхности с точностью ±10°. Шаг сканирования *l* выбирают равным 0,5 $D_{доп}$. Контуры выявленных дефектов очерчивают на поверхности изделия мягким карандашом по показаниям дефектоскопа.

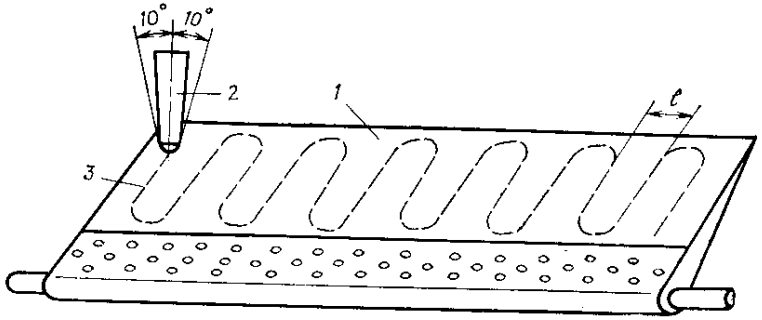


Рис. 6.35. Схема сканирования датчика при контроле клеевого соединения обшивки с сотовым заполнителем импедансным методом:
1 — обшивка; *2* — датчик; *3* — траектория сканирования; *l* — шаг сканирования

Участки со смятыми сотами могут давать ложные показания. Ложные показания могут возникать в виде периодического включения лампочки при контроле тонких обшивок из алюминиевого сплава толщиной 0,3—0,6 мм на сотах с размерами сторон ячеек 6 мм.

Сотовые панели с мелкими и средними ячейками заполнителя (сторона ячейки 2,5—4 мм) и средними толщинами обшивок (0,4—0,6 мм для алюминиевых сплавов) контролируют импедансным методом в фазовом варианте.

Глава 7

РЕНТГЕНОВСКИЙ КОНТРОЛЬ

§ 7.1. Сущность рентгеновского контроля. Рентгеновские аппараты

Рентгеновское излучение, как и видимый свет, по своей природе — это высокочастотные электромагнитные волны. Оно отличается от видимого света значительно меньшей длиной волны (диапазон длин волн рентгеновского излучения при напряжениях на трубке 1000 — 6 кВ $\lambda = 0{,}001 \div 0{,}206$ нм, а света $\lambda = 400 \div 750$ нм). Поэтому энергия фотонов рентгеновского излучения

$$E = \frac{2 \cdot 10^{-16}}{\lambda}$$

(где E — энергия излучения, Дж, λ — длина волны, нм) в десятки и сотни тысяч раз больше энергии фотонов видимого света.

Чем больше энергия излучения, тем выше его проникающая способность. Коротковолновое излучение, обладающее высокой проникающей способностью, называют жестким, а длинноволновое — мягким.

Источником рентгеновского излучения являются двухэлектродные рентгеновские трубки. Жесткость рентгеновского излучения зависит от высокого напряжения, приложенного к трубке:

$$\lambda = \frac{12{,}4 \cdot 10^{-6}}{U},$$

где U — напряжение на трубке, В; λ — длина волны, см.

Рентгеновское излучение, кроме высокой проникающей способности, обладает также ионизирующим, световозбуждающим и фотографическим действиями. Все эти свойства используются при рентгенографическом контроле деталей.

Методы рентгеновского контроля оптически непрозрачных объектов (деталей, агрегатов) основаны на принципе ослабления интенсивности излучения, прошедшего объект. Установлено, что фотоны, сталкиваясь с атомами просвечиваемого материала, теряют свою энергию за счет фотоэлектрического поглощения и рассеяния, т. е. за счет преобразования их в кинетическую энергию электронов и рассеянного (вторичного, более длинноволнового по

сравнению с падающим) излучения. Рассеянное излучение от детали распространяется в различных направлениях.

Интенсивность широкого пучка излучения J_d за просвечиваемой деталью толщиной d равна

$$J_d = J_0 e^{-\mu d} B,$$

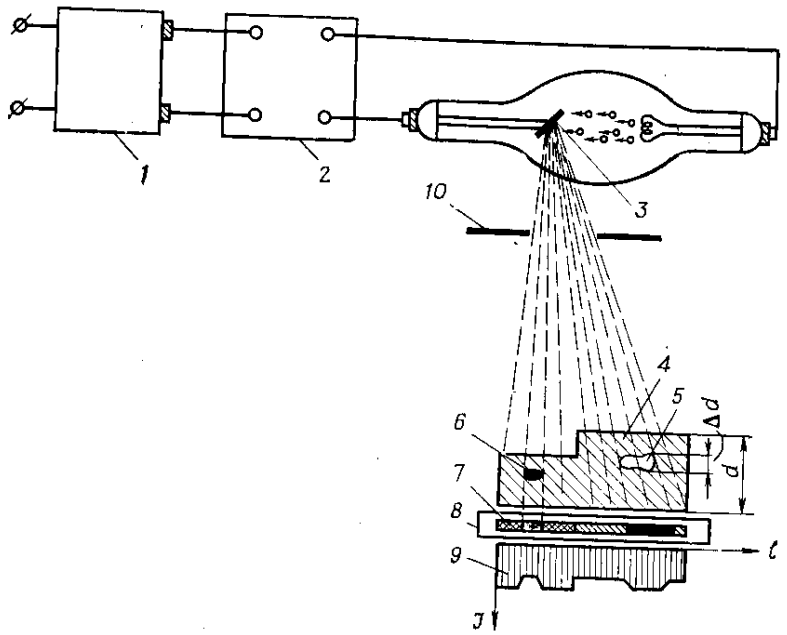


Рис. 7.1. Схема просвечивания детали рентгеновским излучением:

1 — пульт управления; *2* — высоковольтное питающее устройство; *3* — фокусное пятно рентгеновской трубки; *4* — контролируемая деталь; *5* — раковина; *6* — плотное включение; *7* — рентгеновская пленка; *8* — кассета; *9* — эпюра интенсивности *J* рентгеновского излучения за деталью; *10* — диафрагма

где J_0 — интенсивность первичного излучения перед деталью;

B — фактор накопления, характеризующий поток рассеянного излучения за деталью, попадающего на пленку;

μ — линейный коэффициент ослабления, зависящий от энергии излучения и плотности материала.

Чем меньше энергия излучения и больше плотность материала, тем больше значение μ.

Если контролируемый объект (рис. 7.1) неодинаков по толщине, имеет раковину или более плотное включение, то за объектом интенсивность пучка излучения будет неодинакова: в месте раковины, например, она выше, чем в местах, где нет дефектов. Регистрируя степень ослабления интенсивности излучения за контролируемым объектом, можно определить наличие в нем дефектов. Для регистрации радиационных изображений при контроле

деталей в аэродромных условиях в основном используют рентгеновские пленки. После фотообработки экспонированной пленки на ней получается негативное изображение объекта — рентгеновский снимок. Дефекты на негативе наблюдаются в виде локального изменения плотности почернения пленки — более плотного по отношению к фону в местах несплошностей типа раковин, пористости, трещин, непроваров и др. и более светлого в местах плотных включений, например вольфрама в стали.

Чувствительность метода определяется наименьшим размером выявляемого дефекта в направлении просвечивания, ее обычно выражают в процентах от просвечиваемой толщины детали. Для оценки чувствительности согласно ГОСТ 7512—75 применяют канавочные, проволочные и пластинчатые эталоны. Для стали наивысшая чувствительность рентгенографического метода составляет 1,5—3% просвечиваемой толщины.

Рентгеновский контроль состоит из следующих технологических операций:

1) подготовки рабочего места и деталей к просвечиванию;
2) зарядки кассет;
3) установки аппаратуры, кассет, нумераторов, эталонов чувствительности и других принадлежностей;
4) просвечивания — экспонирования пленки;
5) фотообработки пленки;
6) расшифровки негативов и оценки качества просвечиваемых объектов.

Контроль проводят в соответствии с технологическими картами, в которых указаны оптимальные условия и режимы контроля — направления просвечивания, тип и размеры пленок, кассет, усиливающих экранов, напряжение и ток на трубке, фокусное расстояние, поле облучения, экспозиция и меры защиты пленки от рассеянного излучения.

Подготовка к просвечиванию включает очистку детали, разметку ее на просвечиваемые участки, нумерацию участков, а также определение необходимых приспособлений для рациональной установки кассет, свинцовых листов и т. д.

Кассету, заряженную пленкой (РТ-5, РТ-4М, РНТМ, РТ-2), прикрепляют к контролируемому участку детали с противоположной ее стороны по ходу излучения. При этом добиваются, чтобы пленка по возможности ближе прилегала к поверхности детали и располагалась перпендикулярно к осевому лучу пучка. Для снижения интенсивности рассеянного излучения закрывают непросвечиваемые участки детали листовым свинцом или ограничивают поле облучения диафрагмой.

Во время экспонирования пленки не допускаются сотрясения и вибрации контролируемого объекта и источника излучения.

Негативы расшифровывают, рассматривая их в проходящем свете негатоскопа или настольной лампы с матовым стеклом. Для обнаружения мелких дефектов пользуются лупой 2—4-кратного

увеличения. При этом период непрерывного наблюдения для предупреждения усталости зрения не должен превышать 30 мин. Одновременно с анализом негатива осматривают визуально поверхность детали, чтобы не принять поверхностный дефект за внутренний. Заключение о качестве контролируемых объектов делают в соответствии с установленными нормами на допустимые и недопустимые несплошности металла и неисправности агрегатов.

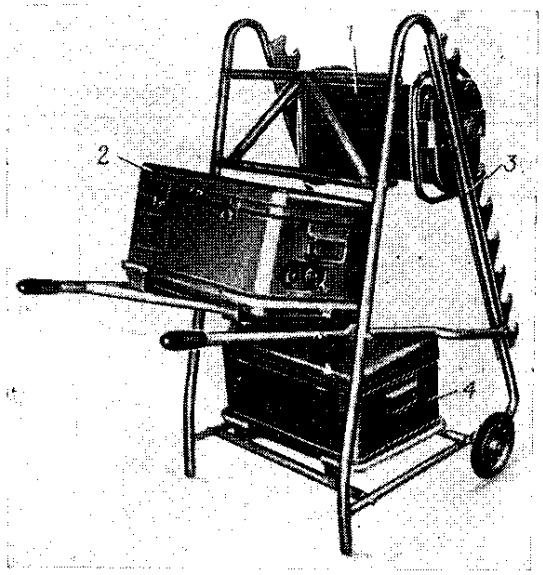


Рис. 7.2. Рентгеновский аппарат РУП-120-5-1:
1 — блок-трансформатор; *2* — пульт управления; *3* — штатив-тележка; *4* — ящик с принадлежностями и запчастями

Рентгеновская аппаратура не является штатным средством контроля авиационной техники. Используются портативные рентгеновские аппараты РУП-120-5-1 и РУП-200-5-2 моноблочной конструкции, рассчитанные для разъездных работ. На рис. 7.2 приведен внешний вид аппарата РУП-120-5-1. Этот аппарат состоит из блока-трансформатора *1*, пульта управления *2*, штатива-тележки *3* и ящика *4* с принадлежностями и запчастями.

Блок-трансформатор заполнен трансформаторным маслом. В нем находится высоковольтное питающее устройство аппарата, состоящее из высоковольтного трансформатора, рентгеновской трубки, трансформатора накала, электродвигателя с крыльчаткой для создания принудительной циркуляции масла и змеевика для охлаждения масла. Пульт управления на верхней панели имеет измерительные приборы и ручки регулировки накала трубки, вы-

сокого напряжения и корректировки напряжения сети. Штатив-тележка предназначена для установки блока-трансформатора по высоте в пределах 40—120 см и поворачивания его вокруг своей оси на любой угол с фиксацией положения.

Конструкция аппарата РУП-200-5-2 аналогична конструкции аппарата РУП-120-5-1. Основные данные этих аппаратов указаны в табл. 15.

Таблица 15

Основные данные рентгеновских аппаратов для контроля деталей

Показатели	РУП-120-5-1	РУП-200-5-2
Номинальное напряжение на рентгеновской трубке, кВ	120	200
Номинальный ток на трубке, мА	5	5
Напряжение питающей сети, В	220/380	220/380
Тип рентгеновской трубки	0,4БПМ2-120	0,7БПМ3-200
Эффективное фокусное пятно трубки, мм	2×2	2×2
Потребляемая мощность, кВ·А	1,5	2,5
Габариты блока-трансформатора, мм	300×250×540	750×270×450
Масса, кг:		
блока-трансформатора	45	88
пульта управления	30	35
Режим работы:		
— без водяного охлаждения — повторный:		
работа, мин	15	15—20
перерыв, мин	60	30
с водяным охлаждением:		
непрерывный, ч	—	3—4
повторный, мин:		
работа	60	—
перерыв	30	—
Наибольшая толщина просвечиваемого материала с применением флуоресцирующих усиливающих экранов, мм:		
стали	25	60
алюминия	100	300

Перспективным для применения в аэродромных условиях является новый моноблочный портативный рентгеновский аппарат РАП-160-10Н с газовыми изоляцией и охлаждением рентгеновской трубки. Масса блока трансформатора — 46 кг. Толщина просвечиваемого материала: стали — до 40 мм, легких сплавов — до 200 мм.

Для просвечивания различных объектов непосредственно на самолетах и вертолетах могут быть использованы также портативные гамма-дефектоскопы шлангового типа «Гаммарид-23» с закрытым радиоизотопным источником γ-излучения ГИД-Ц-2 (ГОСТ 16002—70), активностью 2 г-экв. радия. Период полураспада изотопа цезий-137 29,6 года; энергия излучения 0,662 МэВ. Масса радиационной головки — 12 кг, пульта управления — 3 кг. Наибольшая толщина просвечиваемых деталей: стальных — 60 мм, из алюминиевых сплавов — до 120 мм. Управление перемещением источника — ручное, с расстояния до 12 м; подача источника по гибкому ампулопроводу — до 8 м. Основное достоинство этого дефектоскопа — малые размеры источника излучения, который по ампулопроводу может подаваться в труднодоступные места различных конструкций.

§ 7.2. Области применения и технические возможности рентгеновского контроля

Методы просвечивания авиационных деталей и агрегатов занимают среди других методов дефектоскопии особое место. Они позволяют контролировать детали любой формы, из различных материалов, обнаруживать внутренние дефекты материала, определять состояние закрытых деталей в агрегатах и механизмах, которые трудно или невозможно демонтировать для их визуального осмотра или для проверки другими средствами контроля.

Применение рентгеновского контроля при разовых профилактических осмотрах самолетов и вертолетов в ряде случаев имело решающее значение для поддержания высокой надежности авиационной техники и обеспечения безопасности полетов.

Основными дефектоскопическими задачами, эффективно решаемыми рентгеновским контролем в эксплуатации авиационной техники, являются:

1. Выявление внутренних дефектов в сварных швах, паяных и клепаных соединениях (непровары, раковины, пористость, трещины, проплавы, непропаи, деформация и перекос стержня заклепки и др.). Примером эффективного применения рентгеновского метода для контроля сварных швов в эксплуатации может служить разовый профилактический осмотр штырей подвесных топливных баков. На рис. 7.3 приведены вид осевого разреза штыря, на котором стрелкой показан выявленный непровар в кольцевом шве, и его рентгеновское изображение.

2. Выявление скрытых дефектов в слоистых конструкциях, например опасного концентратора напряжений — технологического отверстия в полке балки крыла, не заваренного на некоторых самолетах при доработке крыла. Обнаружить это отверстие на самолете без демонтажа узла визуально невозможно, так как полка балки с одной стороны закрыта стальным фитингом, а с другой — стальной прокладкой и дюралюминиевой обшивкой. Трудозатраты на демонтаж и монтаж узла для осмотра детали составляют 300 чел.-ч. Рентгеновским контролем узел проверяют за 1 ч. На рис. 7.4 приведена рентгенограмма (позитив), полученная при просвечивании указанной слоистой конструкции крыла, на которой выявлено незаваренное отверстие (показано стрелкой).

При проведении рентгеновского контроля закрытых кронштейнов силовых рам фюзеляжа в них выявляют трещины.

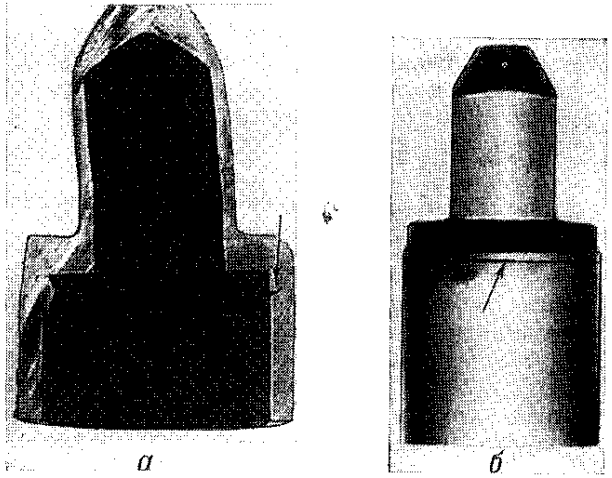


Рис. 7.3. Осевой разрез штыря подвесного топливного бака, в кольцевом сварном шве которого рентгеновским просвечиванием обнаружен непровар (*а*), и рентгенограмма штыря (*б*)

3. Определение состояния внутренних деталей, их взаимного расположения и скрытых неисправностей в агрегатах, сложных узлах, герметизированных блоках радио- и коммутационной аппаратуры и т. д. (неправильный монтаж, разрушение, деформация или смещение деталей, чрезмерный износ и наличие недопустимых люфтов или зазоров, несоответствие размеров, отказы автоматики и т. д.). Так, например, рентгеновский контроль эффективно применяют для обнаружения вытяжки тросов из наконечников систем тросового управления вертолетом (рис. 7.5) и тросов принудительного раскрытия парашютов, определения положения внутренней цанги в амортизационных стойках шасси, износа и разрушения сепараторов в закрытых подшипниках, смещения спая, обрывов нити у спая и замыкания нити на корпус в термопарах Т-6, неправильного за-

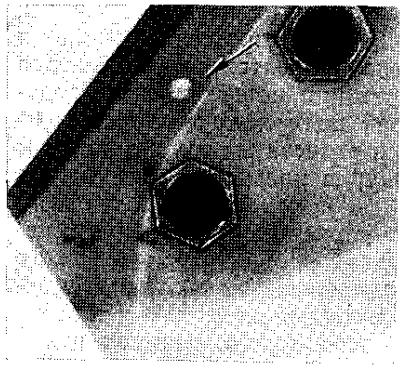


Рис. 7.4. Рентгенограмма участка балки крыла. Выявлено технологическое отверстие, не допускаемое в полке балки

цепления зубьев шестерен в угловых редукторах крыльевых щитков, смещения анероидных коробок в автоматическом распределителе топлива АРТ-8 и т. д.

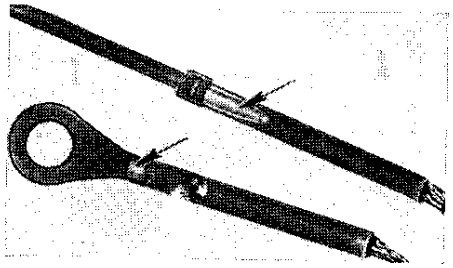


Рис. 7.5. Рентгенограмма (позитив) наконечников тросового управления вертолетом. Обнаружена вытяжка троса из наконечника в месте его заделки

4. Определение местоположения посторонних предметов и веществ в труднодоступных местах конструкции, например воды в сотах сотового заполнителя триммера (рис. 7.6), случайно попав-

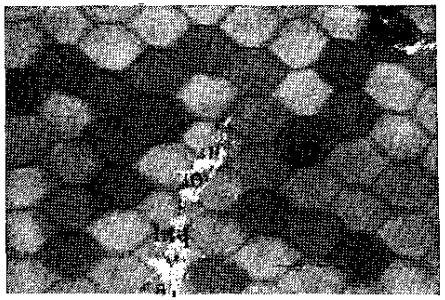


Рис. 7.6. Рентгенограмма (позитив) участка триммера. Обнаружена вода в сотах сотового заполнителя

ших в отсеки гаек, инструмента и других предметов, которые могут привести к отказу систем управления в полете.

5. Выявление глубокой, опасной очаговой коррозии на внутренних поверхностях полых деталей, не доступных для визуального осмотра — баллонов огнетушителей (рис. 7.7), цилиндров, трубопроводов, штоков клапанов и др.

6. Определение отклонений от заданных размеров внутренних полостей (подрезы, разностенность, неправильная расточка пазов

под уплотнительные кольца и другие дефекты механической обработки). Для выявления этих отклонений рентгеноконтролю подвергают масляные форсунки, масляные трубки, штоки толкателей и т. д.

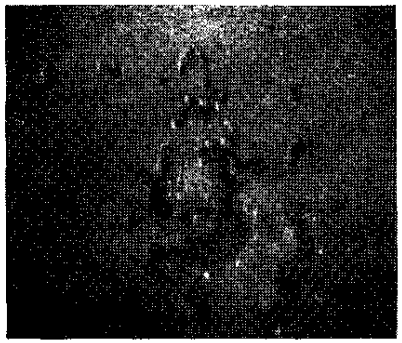


Рис. 7.7. Рентгенограмма, полученная при просвечивании баллона огнетушителя. Обнаружена глубокая коррозия

Перечисленные задачи также эффективно решаются просвечиванием различных объектов при исследовании отказавшей авиационной техники. В ряде случаев по рентгеновским или γ-сним-

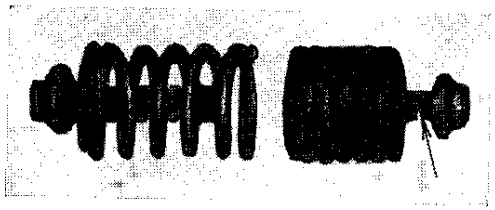


Рис. 7.8. Рентгенограмма (позитив) гидрозамка управления закрылками самолета. Обнаружено заклинивание пружины правого гидрозамка

кам агрегатов определяют причины отказов их в работе. Например, при просвечивании гидрозамка управления закрылками выявлено заклинивание пружины правого гидрозамка. На рентгенограмме (рис. 7.8) стрелкой показан открытый клапан слива в результате заклинивания пружины. Рентгеновским просвечиванием автомата защиты сети (рис. 7.9) установлено, что в нем отсутствует пружина регулировочного винта, что привело к самопроизвольному срабатыванию автомата в условиях воздействия вибрационных нагрузок.

Использование рентгенотелевизионных установок, дающих возможность получать изображения исследуемого объекта на экране телевизионного приемника со значительным увеличением

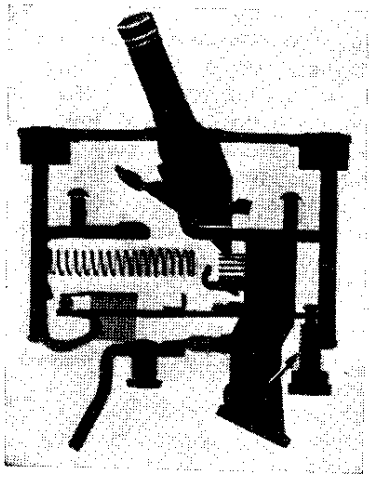


Рис. 7.9. Рентгенограмма (позитив) автомата защиты сети. Выявлено отсутствие пружины регулировочного винта

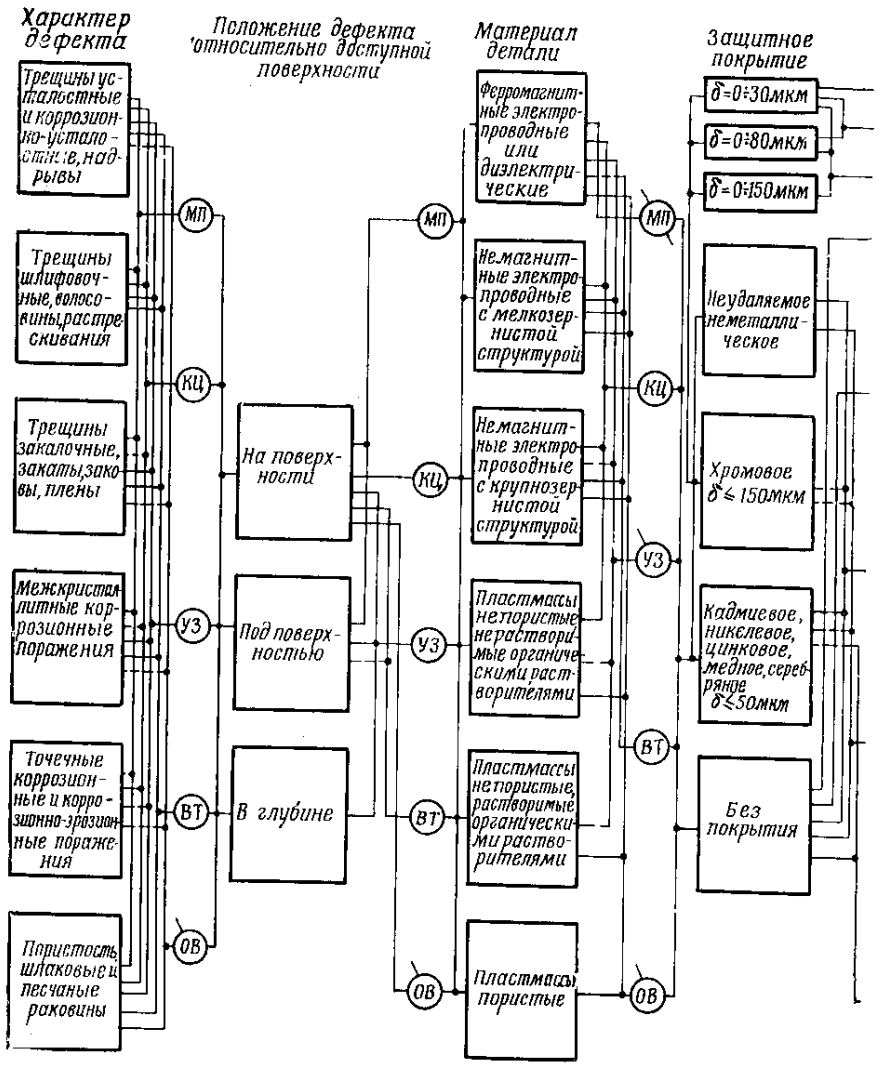
(до 30—50 раз), особенно эффективно для контроля изделий небольших размеров (полупроводниковых элементов, микросхем, микроподшипников и т. д.).

§ 7.3. Основные требования техники безопасности

Рентгеновское и гамма-излучения оказывают биологическое действие, т. е. ионизируют вещества, из которых состоят клетки живого организма. Это действие пропорционально поглощенной дозе излучения. При значительных дозах облучения всего человеческого организма может наступить различной степени лучевое заболевание. Поэтому при работе должны приниматься меры защиты от облучения. Соблюдение требований «Основных санитарных правил» (ОСП-72) и «Норм радиационной безопасности» (НРБ-69) позволяет длительно работать с источниками излучений без вреда для здоровья.

К работе по рентгеновскому и гамма-контролю могут быть допущены только специалисты, усвоившие правила техники безопасности, прошедшие медицинское освидетельствование и специальный инструктаж.

Перед проведением контроля на самолете в зависимости от направления просвечивания (вниз, вверх, под углом к горизонту) должны быть установлены за просвечиваемым объектом защитные барьеры из свинца или из стали для снижения уровня радиа-



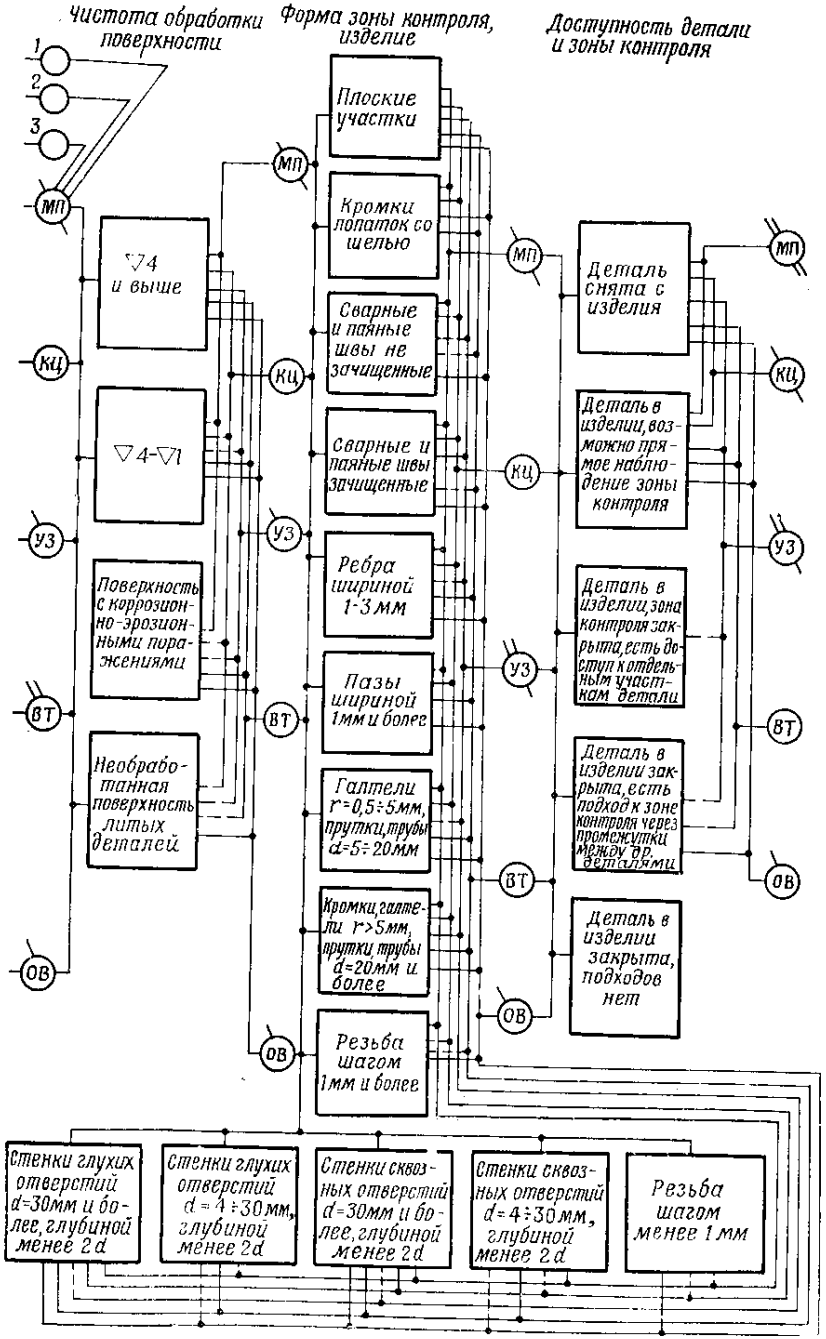


Рис. 8.1. Схема выбора метода контроля по дефектоскопическим характеристикам детали:

МП — магнитопорошковый; *КЦ* — капиллярный цветной; *УЗ* — ультразвуковой; *ВТ* — вихревых токов; *ОВ* — оптико-визуальный; *1* — контроль суспензией на остаточной намагниченности; *2* — контроль суспензией в приложенном поле; *3* — контроль воздушной взвесью порошка в приложенном поле

(КЦ) — второе; для ультразвукового (УЗ) — третье; для метода вихревых токов (ВТ) — четвертое; для оптико-визуального метода (ОВ) — пятое.

Возможность применения данного МНК без ограничения изображается сплошной горизонтальной линией. Если применение МНК частично ограничено, то этому соответствует штриховая линия. Если МНК неприменим, то горизонтальная линия отсутствует.

Рассмотрим, например, возможности МНК по выявлению точечных коррозионных поражений. Около соответствующего прямоугольника изображены: первая линия, считая сверху, — штриховая, вторая — сплошная, третья — штриховая, четвертая линия отсутствует, пятая — штриховая. Это значит, что данный дефект хорошо выявляется цветным методом, удовлетворительно — магнитопорошковым, ультразвуковым и оптико-визуальным, но не выявляется методом вихревых токов.

Возможности магнитопорошкового метода в отношении контроля деталей с различной толщиной покрытия рассмотрены более подробно: указано, какие способы эффективны для обнаружения дефектов под покрытиями толщиной 0—30, 0—80, 0—150 мкм.

Схему, изображенную на рис. 8.1, анализируют слева направо.

Анализ схемы состоит в определении возможностей использования методов применительно к каждому параметру данного объекта и изображении таких возможностей, например, путем зачеркивания на схеме непригодных или малопригодных методов.

Если МНК непригоден, то все окружности, в которых указано условное обозначение метода, справа от анализируемого параметра перечеркиваются полностью. Если МНК малопригоден (недостаточно эффективен), то окружности перечеркиваются наполовину.

Пример. Необходимо выбрать метод для выявления трещин на выходной кромке охлаждаемых лопаток турбин (со щелью в кромке), не снимая их с двигателя.

Дефектоскопические характеристики объекта контроля:

— характер и положение дефекта — поверхностные трещины усталости;

— материал лопатки — немагнитный крупнозернистый сплав;

— защитное покрытие — отсутствует;

— чистота обработки поверхности — ▽6;

— форма зоны контроля — кромка со щелью;

— доступность детали и зоны контроля — деталь в изделии закрыта, есть подход к кромке через промежутки между другими деталями.

Рассмотрим последовательно возможности МНК применительно к перечисленным дефектоскопическим характеристикам кромки лопатки.

Для выявления трещин усталости оптико-визуальный метод малопригоден. Перечеркиваем наполовину все окружности с обозначением «ОВ». На применение остальных МНК ограничений по этому признаку нет.

Для выявления поверхностных дефектов ограничений на применение всех МНК нет. Поэтому справа от этого параметра дополнительно ничего не вычеркивается.

Для контроля немагнитного крупнозернистого сплава магнитопорошковый метод непригоден, ультразвуковой — недостаточно эффективен. Справа от этого параметра полностью перечеркиваются пять окружностей с обозначением «МП», наполовину перечеркиваются пять окружностей с обозначением «УЗ».

Для контроля детали без защитного покрытия ограничений на применение всех МНК нет.

Для контроля деталей с чистотой обработки поверхности ▽6 ограничений на применение всех МНК нет.

Для контроля кромки лопатки со щелью ультразвуковой метод неприменим. Вычеркиваем две окружности справа с обозначением «УЗ».

По доступности детали и зоны контроля магнитопорошковый метод и метод цветной дефектоскопии непригодны. Вычеркиваем в последнем ряду по одной окружности с обозначениями «МП» (вычеркивается второй раз) и «КЦ».

Таким образом, в результате анализа остался невычеркнутым метод вихревых токов. Имеющийся токовихревой дефектоскоп ВДЦ-1М может быть применен для решения стоящей задачи, если его снабдить специальным устройством для доставки датчика к кромке лопатки через проходы между деталями двигателя и перемещения по ней.

Во всех случаях возможности по чувствительности (см. табл. 2) выбранного МНК должны сопоставляться с нормами на браковку.

Если в результате анализа схемы будет установлена возможность применять два или более методов, то для окончательного выбора одного из двух методов следует учитывать показатели эффективности МНК (см. § 1.4).

На практике в конкретных случаях могут встретиться задачи, для решения которых использование того или иного распространенного в эксплуатации метода или даже комплекса методов может оказаться недостаточно эффективным. В этих случаях необходимо применять новые методы, разрабатываемые научно-исследовательскими учреждениями.

§ 8.2. Лаборатория дефектоскопии и организация выполнения работ

В подразделениях, выполняющих регламентные работы на авиационной технике, выделяют помещения — лаборатории дефектоскопии (рис. 8.2). В лаборатории сосредоточивают все предусмотренные штатом средства дефектоскопического контроля,

технологическую документацию, действующие методические пособия, учебные плакаты. Как правило, в помещении размещают два стола размерами не менее 700×500×800 мм, покрытые листом из пластика или из алюминиевого сплава, шкаф или стеллаж

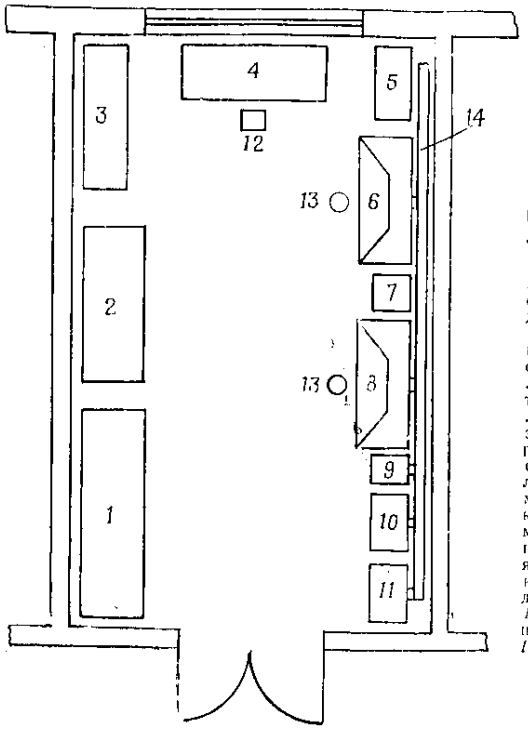


Рис. 8.2. Вариант размещения оборудования в лаборатории дефектоскопии подразделения:

1 — стеллаж (шкаф) для дефектоскопов; *2* — стеллаж для деталей; *3* — шкаф (полка) для книг; *4* — стол письменный; *5* — витрина с образцами дефектных деталей; *6* — стол с электропитанием для контроля деталей токовихревым, ультразвуковым или магнитопорошковым методами; *7* — стол (тумба) для бинокулярного стереоскопического микроскопа; *8* — стол для контроля деталей цветным методом; *9* — ящик для использованной ветоши; *10* — ящик для дефектоскопических материалов; *11* — шкаф для спецодежды; *12* — стул; *13* — стулья с поворотно-подъемными сиденьями; *14* — воздуховод вытяжной вентиляции

для хранения дефектоскопов, полку для книг, письменный стол для оформления технической документации, металлический ящик размерами не менее 600×400×400 мм для хранения дефектоскопических материалов, витрину с образцами дефектных деталей, ящик для сбора использованной ветоши, шкаф для спецодежды.

Для настройки дефектоскопов, тренажа специалистов и проведения контроля деталей, снимаемых с самолета или с вертолета, оборудуют рабочие места соответственно каждому методу дефектоскопии. Если в лаборатории выполняют большой объем работ по цветному контролю деталей, то рабочее место обеспечивают местной вытяжной вентиляцией.

На все типы ЛА, на которых выполняют регламентные работы, оформляют в виде плакатов перечни деталей, подлежащих дефектоскопическому контролю. В перечне указывают тип самолета (вертолета), наименование детали, наименование узла, в котором установлена проверяемая деталь, тип дефектоскопа, ос-

нование для проведения контроля (пункт Единого регламента, номер указания или бюллетеня), периодичность работ.

На каждую деталь, подлежащую дефектоскопическому контролю, разрабатывают технологическую карту с эскизом проверяемой детали, с обозначением зон контроля и возможного направления трещин, с указанием средств и приемов контроля. В качестве примера в табл. 16 приведена технологическая карта контроля магнитопорошковым методом подкоса шасси вертолета.

Измерительные приборы (микроамперметры, амперметры, вольтметры), установленные в дефектоскопах, проходят периодическую поверку.

Работоспособность дефектоскопов и качество дефектоскопических материалов проверяют каждый раз перед их применением. Неисправные дефектоскопы и некачественные дефектоскопические материалы в лаборатории дефектоскопии держать не разрешается.

Для проведения дефектоскопического контроля деталей авиационной техники при выполнении регламентных работ и целевых осмотрах в каждом эксплуатирующем подразделении приказом назначают группу специалистов из авиационных механиков и техников, успешно сдавших зачеты и удовлетворяющих требованиям, изложенным в § 1.4. Ежегодно эти специалисты под руководством подготовленного в области дефектоскопии инженера изучают методы и средства дефектоскопии по утвержденной программе, рассчитанной на 40—60 ч занятий.

Далее приведена примерная программа занятий по магнитопорошковому методу дефектоскопии.

Тема 1. **Основы контроля деталей магнитопорошковым методом**

Время 4 ч

Сущность контроля. Поле рассеяния над дефектом. Случаи контроля на остаточной намагниченности и в приложенном поле.

Полюсное, циркулярное, локальное намагничивание.

Зависимость способа намагничивания от свойств материала, формы и размеров детали, направления предполагаемых дефектов.

Зависимость выявляемости дефектов от вида (постоянный, синусоидальный, импульсный) и значения тока.

Необходимость и приемы размагничивания циркулярно, полюсно и локально намагниченных деталей.

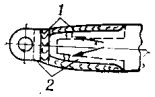
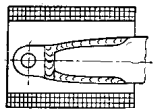
Тема 2. **Конструкция и технические данные переносных магнитных дефектоскопов 77ПМД-3М, ПМД-70 и передвижного дефектоскопа МД-50П**

Время 2—5 ч

Состав комплекта и назначение его частей. Схемы дефектоскопов. Назначение коммутирующих устройств, выведенных на лицевые панели дефектоскопов. Практическая работа с приборами 77ПМД-3М, или ПМД-70, или МД-50П. Признаки неисправности дефектоскопов и способы их устранения.

Таблица 16

Пример заполнения технологической карты при магнитопорошковом контроле деталей

«Утверждаю»	Технологическая карта магнитопорошкового контроля			На 1 листе
Тип летательного аппарата: **Ми-4**	Наименование узла: **шасси**	ТУ на отбраковку: **трещины не допускаются**	Способ контроля: на **остаточной намагниченности. Переключатель на катушке в положении ПОСТ. ТОК.**	Тип дефектоскопа: **77ПМД-3М**
Наименование, номер детали: **подкос, 56-4100-40**	Материал детали: **30ХГСНА**			Питание дефектоскопа: **24 В**
Зоны контроля (ЗК)		Перечень операций контроля и расшифровка результатов		Устройство для намагничивания: **катушка**
Сварные швы *1* у проушины и прилегающие к ним участки *2* шириной 5—8 мм (зона контроля обведена штриховыми линиями) 	**1. Освободить конец подкоса и отвести его от фюзеляжа на 20—30 см согласно действующей технологии.** **2. Удалить краску с ЗК смывкой АФТ-1.** **3. Надеть катушку на подкос.** 			Питание катушки: **от дефектоскопа** Принадлежности и материалы: **— суспензия керосино-масляная (50% МК-8 и 50% керосина), 20—35 г порошка (МРТУ 6-14-1009—74) на литр смеси;**
	4. Подготовить дефектоскоп к работе. **5. Включить ток в катушке на 1—2 с.** **6. Снять катушку с подкоса.** **7. Нанести магнитную суспензию из бачка (или груши) на ЗК. Осмотреть ЗК с помощью лупы. При осмотре особое внимание обращать на границы сварных швов, где наиболее вероятно возникновение трещин.** **8. Размагнитить подкос, для чего надеть катушку на подкос, включить ток в катушке и, вращая ручку коммутатора (1—2 об/с), снять катушку с подкоса и отнести ее вдоль продольной оси подкоса на 0,5—0,7 м, выключить ток.** **9. Проверить качество размагничивания прибором ПКР-1.** **10. Восстановить лакокрасочное покрытие согласно действующей технологии**			**— смывка АФТ-1;** **— ветошь;** **— жесткая волосяная щетка** Составил:

Тема 3. **Технология контроля деталей магнитопорошковым методом**

Время 3 ч

Основные требования, предъявляемые к суспензиям. Способы приготовления и контроля качества суспензий. Контрольные образцы. Способы нанесения суспензии на детали.

Выделение зон контроля на деталях. Способы удаления защитных покрытий и загрязнений в зонах контроля.

Признаки осаждения порошка над различными дефектами. Признаки выявления мнимых дефектов. Ошибки, допускаемые при магнитопорошковом контроле.

Тема 4. **Методики контроля конкретных деталей**

Время 1—5 ч

Практическая работа по контролю двух — пяти разнотипных деталей.

* *
*

Дефектоскопический контроль высоконагруженных деталей и узлов планера и двигателя является одной из важных задач, решаемых инженерно-авиационной службой по предупреждению разрушений элементов конструкций и поддержанию высокой надежности летательных аппаратов и безопасности полетов на них. В последние годы такой контроль авиационной техники проводится все шире, эффективность его возрастает. Однако высокие результаты применения средств контроля достигаются лишь в тех подразделениях, в которых постоянно поддерживаются в работоспособном состоянии дефектоскопические приборы и материалы, регулярно проводится техническая учеба по вопросам дефектоскопии, а обученные специалисты систематически выполняют дефектоскопический контроль, закрепляя полученные знания и накапливая опыт.

Значительную помощь в практическом обучении специалистов по дефектоскопии призваны оказать кинокурс «Неразрушающие методы контроля авиационной техники», включающий шесть кинофильмов, а также пять учебных диафильмов на ту же тему. Эти пособия, созданные впервые в нашей стране, выпущены в 1977 г. киностудией Министерства обороны.

Большой опыт применения дефектоскопии в отечественной авиации показал необходимость дальнейшего совершенствования средств контроля в направлении создания малогабаритных приборов многоцелевого использования и дефектоскопических материалов, отвечающих современным требованиям.

Уровень современной технической науки, возросшие нагрузки на ответственных узлах ЛА и высокие требования к их надежности делают неотложной задачу разработки систем встроенного дефектоскопического контроля. Все это позволит сделать новый шаг в повышении эффективности дефектоскопического контроля деталей и узлов авиационной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Боровиков А. С. Капиллярная дефектоскопия. М., «Машиностроение», 1971.

Выборнов Б. И. Ультразвуковая дефектоскопия. М., «Металлургия», 1974.

Гурвич А. К., Ермолов И. Н. Ультразвуковой контроль сварных швов. Киев, «Техника», 1972.

Денсль А. К. Дефектоскопия металлов. М., «Металлургия», 1972.

Дефектоскопия деталей локомотивов и вагонов. Колл. авт.: Левыкин Ф. В., Лысенко И. М., Матвеев А. Н., Штремер А. П. М., «Транспорт», 1974.

Добромыслов В. А, Румянцев С. В. Радиационная интроскопия. М., Атомиздат, 1973.

Дорофеев А. Л. Электроиндуктивная дефектоскопия. М., «Машиностроение», 1967.

Еремин Н. И. Магнитная порошковая дефектоскопия. М., «Машиностроение», 1972.

Защитные устройства. Справочное пособие под ред. Б. М. Злобинского. М., «Металлургия», 1971.

Карякин А. В., Боровиков А. С. Люминесцентная и цветная дефектоскопия. М., «Машиностроение», 1972.

Кифер И. И. Испытание ферромагнитных материалов. М., «Энергия», 1969.

Неразрушающий контроль металлов и изделий. Справочник под ред. Самойловича Г. С. М., «Машиностроение», 1976.

Преображенский А. А. Магнитные материалы. М., «Высшая школа», 1965.

Румянцев С. В. Радиационная дефектоскопия. Изд. 2-е. М. Атомиздат, 1974.

Шмелев В. К. Рентгеновские аппараты. Изд. 4-е. М., «Энергия», 1974.

Шрайбер Д. С. Ультразвуковая дефектоскопия. М., «Металлургия», 1965.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие 3

Глава 1. **Роль и место методов дефектоскопии в эксплуатации авиационной техники** 5

§ 1.1. Задачи и значение эксплуатационной дефектоскопии . . . . . —
§ 1.2. Дефекты сплошности материала деталей авиационной техники 8
§ 1.3. Сравнительная характеристика и области применения методов дефектоскопии в эксплуатации 14
§ 1.4. Эффективность дефектоскопического контроля авиационной техники 18

Глава 2. **Оптико-визуальный контроль** 21

§ 2.1. Основы оптико-визуального контроля . . . . . —
§ 2.2. Контроль близко расположенных объектов 23
§ 2.3. Контроль удаленных объектов 26
§ 2.4. Контроль скрытых объектов 29
§ 2.5. Особенности оптико-визуального контроля некоторых деталей 35

Глава 3. **Цветная дефектоскопия** 38

§ 3.1. Задачи, решаемые цветным методом в полевых условиях . . . —
§ 3.2. Физические основы и сущность цветного метода 39
§ 3.3. Дефектоскопические материалы 43
§ 3.4. Особенности хранения и проверка качества дефектоскопических материалов 45
§ 3.5. Подготовка деталей к контролю 48
§ 3.6. Технология проявления дефектов 51
§ 3.7. Осмотр деталей и анализ рисунка дефектов 53
§ 3.8. Типичные ошибки при контроле цветным методом 61
§ 3.9. Особенности контроля некоторых деталей 63
§ 3.10. Рабочее место и принадлежности Техника безопасности . . . 65

Глава 4. **Магнитопорошковая дефектоскопия** 70

§ 4.1. Сущность и задачи магнитопорошкового контроля . . . . . —
§ 4.2. Физические основы намагничивания материала 72
§ 4.3. Способы магнитопорошкового контроля 74
§ 4.4. Подготовка детали к контролю 75
§ 4.5. Способы намагничивания. Виды применяемых токов 76
§ 4.6. Определение намагничивающего тока и расчет напряженности поля при контроле с применением кабеля 83
§ 4.7. Факторы, влияющие на чувствительность магнитопорошкового метода 84
§ 4.8. Особенности контроля сварных соединений 89
§ 4.9. Размагничивание деталей 91
§ 4.10. Кинетика осаждения порошка над дефектами 94
§ 4.11. Магнитные порошки, пасты и суспензии 96
§ 4.12. Контрольные образцы, способы изготовления дефектограмм 98
§ 4.13. Расшифровка результатов контроля. Мнимые дефекты 99
§ 4.14. Магнитные дефектоскопы 104
§ 4.15. Последовательность проведения контроля с применением дефектоскопов 77ПМД-3М и ПМД-70 110

Глава 5. **Токовихревая дефектоскопия** 122

§ 5.1. Задачи, решаемые методом вихревых токов в полевых условиях —
§ 5.2. Датчики вихревых токов 123
§ 5.3. Возбуждение и распределение вихревых токов в проверяемой детали 124
§ 5.4. Формирование сигнала датчика 128
§ 5.5. Мешающие факторы при контроле деталей на сплошность . . 132
§ 5.6. Дефектоскоп ВДЦ-1М 135
§ 5.7. Дефектоскопы ВДЛ-2М, ВД-1ГА, ППД-1 141
§ 5.8. Дефектоскопы ДНМ-15, ДНМ-500 144
§ 5.9. Методика применения токовихревых дефектоскопов 147
§ 5.10. Контроль некоторых деталей авиационной техники 153

Глава 6. **Акустическая дефектоскопия** 162

§ 6.1. Области применения акустических методов при эксплуатации авиационной техники . . . . . —
§ 6.2. Природа и свойства акустических волн . . . . . —
§ 6.3. Источники возбуждения ультразвуковых волн 166
§ 6.4. Распространение ультразвуковых волн 169
§ 6.5. Методы акустической дефектоскопии 173
§ 6.6. Ультразвуковые искатели 176
§ 6.7. Основные технические характеристики и принципы работы ультразвуковых импульсных и акустических импедансных дефектоскопов 178
§ 6.8. Мертвые зоны и разрешающая способность дефектоскопа . . . 187
§ 6.9. Типовая методика ультразвукового контроля деталей 190
§ 6.10. Контроль некоторых деталей авиационной техники 197

Глава 7. **Рентгеновский контроль** 208

§ 7.1. Сущность рентгеновского контроля. Рентгеновские аппараты —
§ 7.2. Области применения и технические возможности рентгеновского контроля 213
§ 7.3. Основные требования техники безопасности 217

Глава 8. **Организация дефектоскопического контроля авиационной техники** 219

§ 8.1. Выбор метода контроля деталей . . . . . —
§ 8.2. Лаборатория дефектоскопии и организация выполнения работ 223

Список литературы 229

Павел Иванович Беда, Юрий Алексеевич Глазков,
Сергей Парамонович Луцько, Александр Иванович Угаров,
Геннадий Степанович Шелихов

ДЕФЕКТОСКОПИЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Редактор *Г. И. Калашник*
Переплет художника *Н. И. Карпикова*
Художественный редактор *Н. Б. Нотова*
Технический редактор *Г. Ф. Соколова*
Корректор *Ж. К. Борисова*
ИБ № 895

Г-17635. Сдано в набор 20.07.77 г. Подписано в печать 17.05.78 г.
Формат 60×90/16. Печ. л. 11½. Усл. печ. л. 14,5. Уч.-изд. л. 15,149.
Бумага № 1. Литературная гарнитура. Высокая печать.
Изд. № 7/929. Тираж 4 100 экз. Цена 95 коп. Зак. 791.

Воениздат, 103160, Москва, К-160
2-я типография Воениздата
191065, **Ленинград**, Д-65, Дворцовая пл., 10