

## 6. КОНТРОЛЬ С ПОВЕРХНОСТЕЙ ДИСКОВ

6.1. Контроль с поверхностями дисков проводят наклонными преобразователями с углами ввода  $35-50^\circ$  и частотой  $1,8-4,0$  МГц с целью обнаружения дефектов в околоско-вых зонах (рисунок К.8).

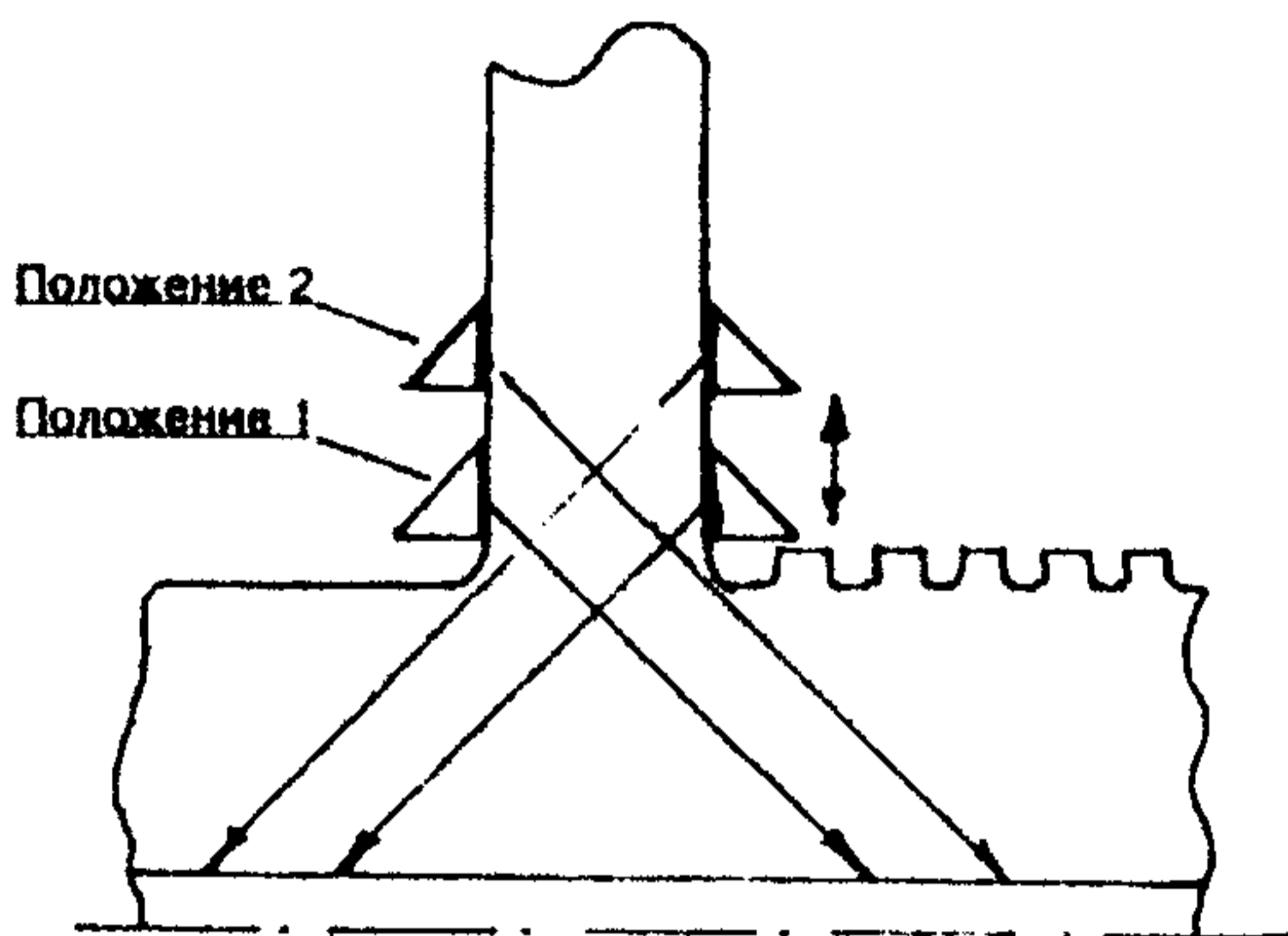


Рисунок К.8 – Схема прозвучивания ротора с поверхностями дисков

6.2. Зона перемещения преобразователя ограничивается галтельным переходом к цилиндрической поверхности (положение 1) и толщиной диска (положение 2).

6.3. Ширина развертки устанавливается в зависимости от угла ввода и наибольшего расстояния до поверхности осевого канала — при максимальном удалении преобразователя от цилиндрической поверхности (положение 2).

6.4. Контроль проводится на чувствительности  $3 \text{ мм}^2$ , рассчитанной по АРД-диаграмме, сканированием к оси ротора с шагом не более половины диаметра (ширины) пьезопластины. Величина опорного сигнала снимается от двугранного угла какого-либо участка ротора с учетом, при необходимости, кривизны наружной поверхности и диаметра осевого канала.

**6.5.** При определении глубины залегания обнаруженного дефекта от цилиндрической поверхности необходимо учитывать, что преобразователь находится в плоскости, развернутой на  $90^\circ$ , а при определении условных размеров дефекта — кривизну поверхности в точке ввода ультразвуковых колебаний.

## **7. ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ**

**7.1.** В протоколе контроля для выявленных дефектов указываются их обобщенные параметры по всем направлениям и способам озвучивания: максимальная глубина залегания, максимальная эквивалентная площадь, максимальные условные размеры, расстояние от торца, окружные координаты.

**7.2.** При обнаружении дефекта вблизи наружной поверхности дополнительно следует проводить контроль дефектного участка цветной, магнитопорошковой дефектоскопией или травлением с предварительной зачисткой места контроля.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ  
ПО ВИХРЕТОВОМУ КОНТРОЛЮ ТЕПЛОВЫХ КАНАВОК  
И РАДИУСНЫХ ПЕРЕХОДОВ НА НАРУЖНОЙ  
ПОВЕРХНОСТИ РОТОРОВ**

**1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

**1.1.** Настоящие Методические рекомендации предназначены для выявления несплошностей типа трещин глубиной 1 мм и более в металле цельнокованных роторов паровых турбин в зонах концентрации напряжений на наружной поверхности: тепловых канавок, придисковых галтелей, радиусных переходов, болтовых отверстий на полумуфте, разгрузочных и заклепочных отверстий на полотне дисков, посадочных мест под лопатки на ободе дисков (при разлопачивании ступени).

**1.2.** Перед проведением контроля для каждого типа ротора изучаются его чертежи и геометрические размеры концентраторов с целью выбора необходимых преобразователей.

**1.3.** Места, подлежащие контролю, зачищаются от рыхлых отложений с помощью наждачного полотна или металлической щетки. Плотный слой окалины допускается не удалять (при выявлении недопустимого дефекта следует провести повторный контроль данного участка после удаления окалины).

**2. СРЕДСТВА ПРОВЕДЕНИЯ КОНТРОЛЯ**

**2.1.** Для контроля рекомендуется применять вихретоковые дефектоскопы типов ВД-88н и ВД-89н, разработанные и изготавливаемые НПО "Спектр", г. Москва. Допускается применение дефектоскопов других типов с техническими характеристиками не хуже названных приборов. ВД-89н применяется для контроля всех типов концентраторов напряжений на поверхности ротора, ВД-88н — не применим для контроля Т-образных пазов обода.

**2.2.** Настройка дефектоскопа производится согласно положениям раздела "Подготовка дефектоскопа к работе" в паспорте на прибор.

2.3. При контроле ротора рекомендуется использовать набор преобразователей производства НПО "Спектр", г. Москва. Для контроля радиусных переходов, галтелей дисков, кромок отверстий на полумуфте и полотне дисков, грибовидных ободов используются штатные карандашного типа преобразователи, входящие в комплект приборов. Для контроля Т-образных пазов под лопатки и тепловых канавок используются специальные преобразователи, изображенные на рисунках Л.1 и Л.2.

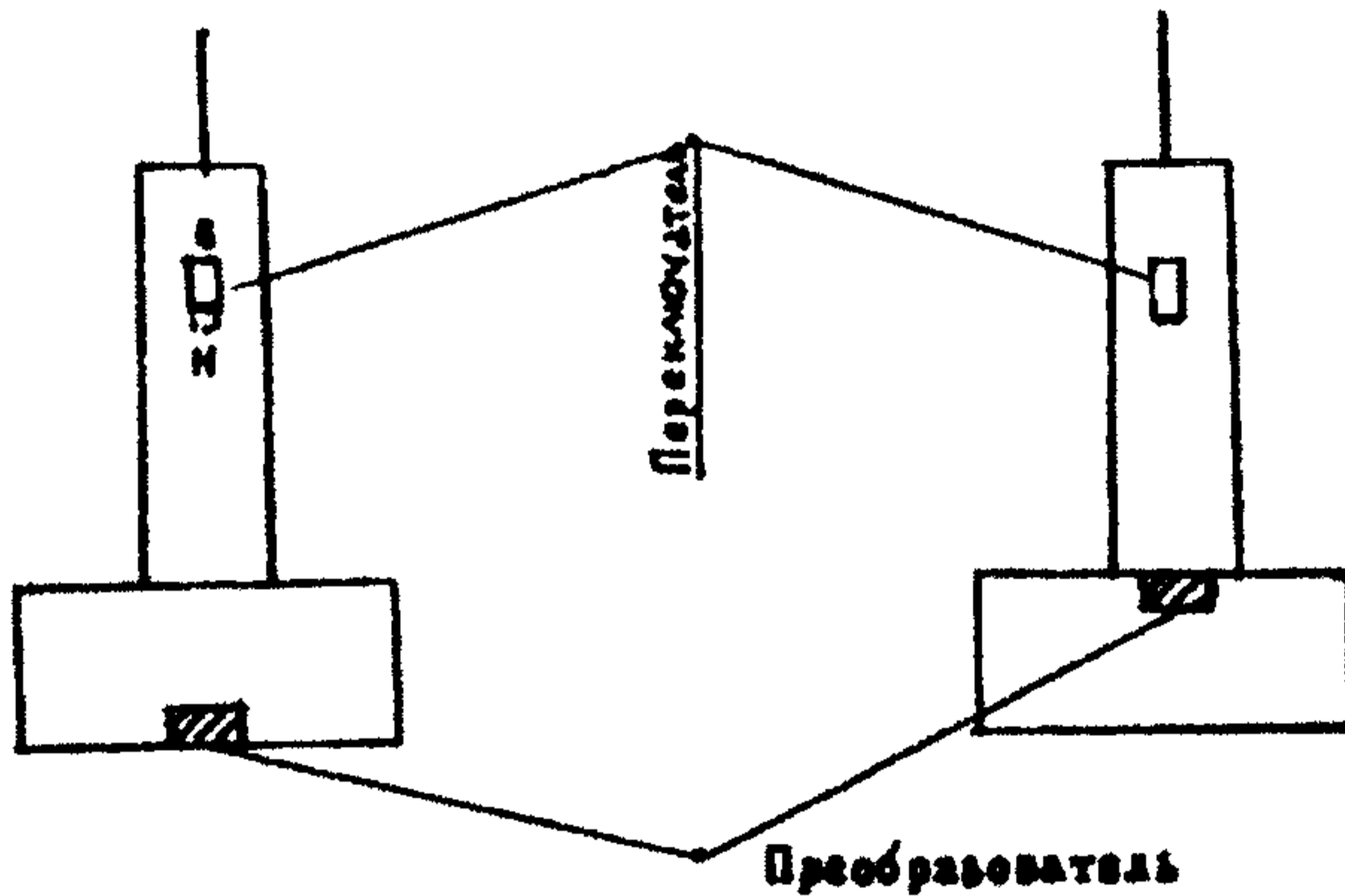


Рисунок Л.1 – Преобразователь для контроля Т-образного паза обода

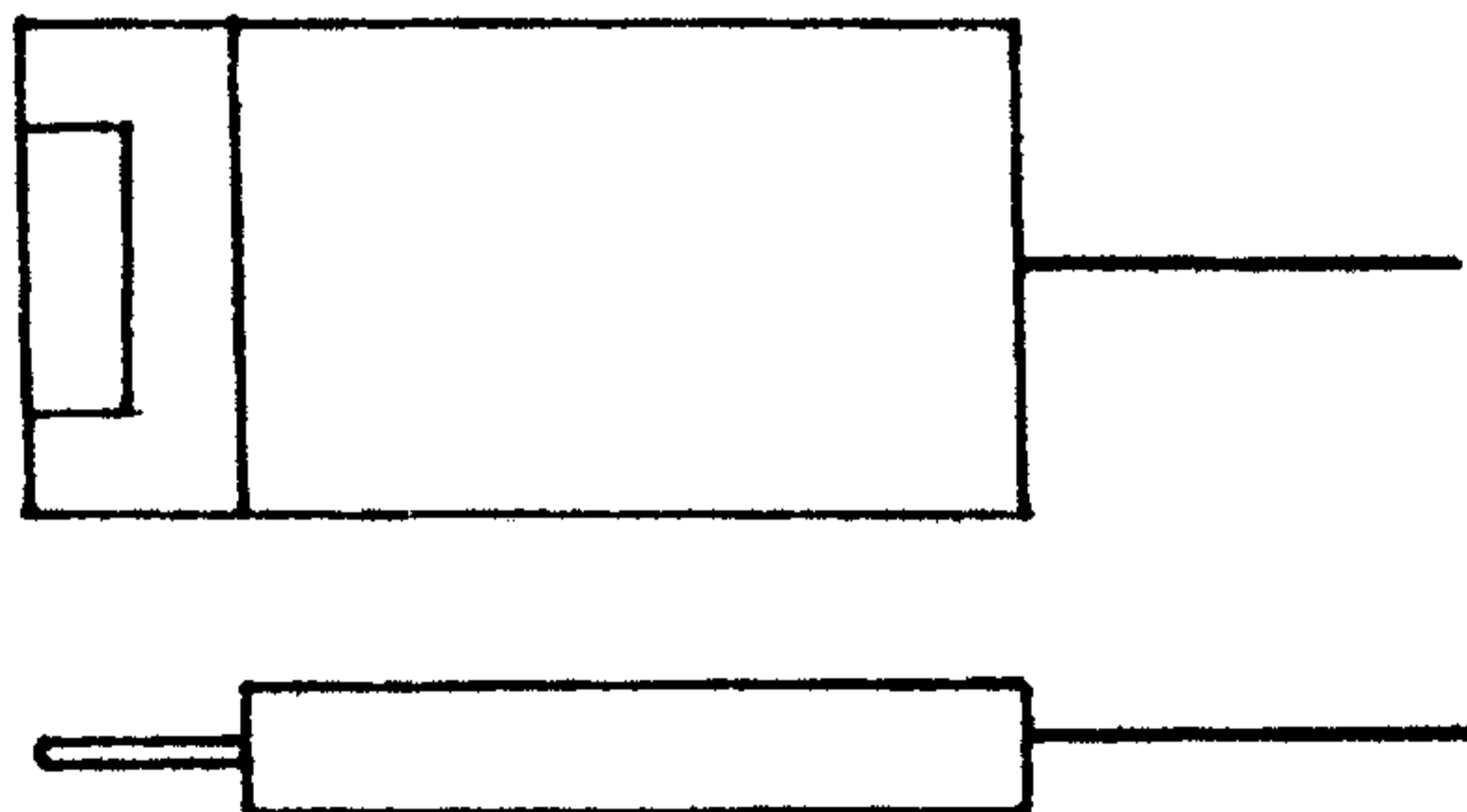


Рисунок Л.2 – Преобразователь для контроля тепловых канавок

### **3. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ КОНТРОЛЯ**

**3.1.** Перед проведением контроля производится настройка чувствительности вихретокового дефектоскопа с выбранным преобразователем на искусственном отражателе (риска) тест-образца. Перед контролем радиусных переходов ротора настройка чувствительности осуществляется на стандартном тест-образце, входящем в комплект к прибору (например ПН-14-ПМА I). Перед контролем тепловых канавок и Т-образных пазов настройка чувствительности производится на специальных образцах, изготовленных из той же стали, что и контролируемый ротор и повторяющий по форме контролируемый концентратор.

**3.2.** Для контроля металла в зоне концентраторов напряжений после настройки чувствительности прибора преобразователь устанавливается на контролируемую поверхность с легким касанием ее, после чего производится сканирование по всей окружности ротора.

**3.3.** Преобразователь для контроля Т-образного паза (см. рисунок Л.1) предусматривает последовательный контроль верхнего и нижнего радиусного перехода на его внутренней поверхности. Переключатель преобразователя устанавливается сначала в нижнее положение, что позволяет производить контроль нижнего концентратора паза возле одной из щек. После сканирования обода по всей окружности переключатель устанавливается в верхнее положение и так же осуществляется полное сканирование по окружности обода для контроля верхнего концентратора противоположной щеки. Затем преобразователь выводится из паза, разворачивается на 180° и те же операции повторяются для контроля верхнего и нижнего не проконтролированных концентраторов.

### **4. ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ**

**4.1.** При наличии дефекта в зоне размещения преобразователя на индикаторе прибора появляется буква "F".

**4.2.** При повторном сканировании уточняется место расположения дефекта по индикации буквы "F", включающейся только при установке преобразователя над дефектом.

**4.3.** Дефектный участок зачищается от окалины и повторно идентифицируется.

**4.4.** При повторном выявлении обнаруженные дефекты отмечаются в протоколе контроля.

**4.5.** Ремонт ротора с выявленными дефектами проводится в соответствии с пп. 5.3.1 и 5.4.1 настоящей Инструкции или по рекомендациям завода-изготовителя турбины.

## **5. ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ**

**5.1.** По результатам контроля составляется протокол, в котором указывается дата контроля, типы турбины и ротора, ее стационарный номер, наработка и количество пусков турбины (ротора) на момент контроля, Ф.И.О. оператора, производящего контроль, типы использованного прибора и преобразователя, контролируемые зоны ротора, сведения и координаты выявленных дефектов.

**5.2.** При регистрации координат выявленных дефектов фиксируются их протяженность и окружная ориентация относительно номера болтового отверстия на полумуфте ротора.

## ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КОРПУСОВ ТУРБИН В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Для выявления трещин в корпусах турбин в практике контроля в течение длительного времени широко применяются методы магнитопорошковой дефектоскопии (МПД), капиллярной дефектоскопии (КД) — обычно применяется метод цветной дефектоскопии (ЦД), и входящий в практику контроля метод вихретоковой дефектоскопии (ВД).

Ниже приведено краткое описание принципов указанных методов и основных технологических характеристик приемов контроля, позволяющих выбрать метод контроля и установить условия для его проведения.

### 1. КАПИЛЛЯРНАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

**1.1.** КД позволяет обнаружить дефекты, выходящие на поверхность: трещины, поры, раковины, межкристаллитную коррозию и другие несплошности. Для контроля корпусов применяют подвид КД — цветную дефектоскопию (ЦД), описанную далее.

**1.2.** Поверхностные дефекты обнаруживаются по ярко окрашенным индикаторным следам, которые образуются на проявляющем покрытии (проявителе) в местах расположения несплошностей.

**1.3.** Выявление дефектов, имеющих ширину раскрытия более 0,5 мм, капиллярными методами контроля не гарантируется.

**1.4.** Контролю КД подлежат поверхности изделия, принятые по результатам визуального контроля.

**1.5.** КД проводится перед проведением контроля другими методами (ультразвуковым, магнитопорошковым). В случае проведения капиллярного контроля после магнитопорошкового объект подлежит размагничиванию.

**1.6.** При проведении КД применяют дефектоскопические материалы и образцы, соответствующие действующей нормативной документации. Дефектоскопические материалы (ДМ) должны быть проверены при получении.

**1.7.** КД можно проводить при температуре от  $-40$  до  $+40$  °С и относительной влажности 90 %. При этом ДМ следует выбирать в зависимости от температуры и заданного класса чувствительности.

**1.8.** КД выполняется при шероховатости поверхности контроля не хуже  $R_z = 20$  мкм, так как при более грубой поверхности большинство из известных ДМ удаляются плохо и составляют фон, мешающий расшифровке результатов контроля.

**1.9.** Имеются ДМ, позволяющие выполнять контроль по более грубой обработанной поверхности, например, ДАК-2Ц ( $R_z \leq 40$  мкм), ИФХ-КОЛОП ( $R_z \leq 30$  мкм).

**1.10.** В зависимости от ширины раскрытия минимальной из выявляемых единичных трещин, установлены три класса чувствительности, определяемые средним раскрытием неразветвленной трещины длиной не менее 3 мм, которые указаны в таблице М.1.

**Таблица М.1**

Класс чувствительности	Ширина раскрытия дефекта, мм	
	Наименьшая	Наибольшая
I	Не нормируется	До 1
II	От 1	До 10
III	От 10	Более

**1.11.** Чувствительность контроля, соответствующая определенному классу, обеспечивается применением конкретных наборов ДМ, в зависимости от заданного класса чувствительности и температуры окружающей среды при соблюдении технологической последовательности операций контроля, требований к подготовке поверхности, освещенностью контролируемой поверхности.

**1.12.** Для контроля корпусных деталей турбин должна быть обеспечена чувствительность по классу II.

**1.13.** Процесс КД состоит из следующих технологических операций:

— проверка ДМ перед контролем на образце контроля чувствительности;



- осмотр контролируемой поверхности;
- очистка от загрязнений, обезжиривание;
- нанесение проявителя (если это требует технология);
- очистка (если наносился проявитель);
- нанесение пенетранта;
- очистка, если требует технология – гашение фона;
- нанесение проявителя;
- осмотр.

**1.14.** Индикаторные следы при контроле капиллярным методом при наличии дефектов на контролируемой поверхности подразделяются на две группы: протяженные и округлые.

**1.15.** Протяженный индикаторный след характеризуется отношением длины к ширине больше трех (трещины, закаты).

**1.16.** Округлый индикаторный след характеризуется отношением длины к ширине, равным или менее трех.

**1.17.** Технология КД требует больших затрат времени: цикл выдержки при контроле, начиная от подготовки поверхности (обезжиривание и первичное нанесение проявителя) до начала первого осмотра (не считая затрат времени на сами операции), колеблется от 30 – 35 мин до 1 ч в зависимости от применяемых растворов и технологии.

**1.18.** Нанесение растворов на контролируемую поверхность обычно производится распылением, что позволяет экономно расходовать растворы, и, что главное, равномерно распылять растворы по контролируемой поверхности. При этом газ-транспортер не должен содержать агрессивных включений и масел. Это ограничивает применение воздушных компрессоров и отдает предпочтение растворам в аэрозольных баллонах.

**1.19.** Допускается нанесение растворов кистью, но здесь требуется высокая квалификация исполнителей при нанесении адсорбента (проявителя): слой адсорбента должен наноситься за один раз, так как при повторном нанесении есть опасность смыть появляющийся пенетрант и пропустить дефект.

**1.20.** КД выполняется по нормативным документам на контроль, которые должны отвечать требованиям утвержденных нормативных документов.

**1.21.** КД выполняется по технологическим картам контроля согласно государственным стандартам.

**1.22.** Контроль КД рекомендуется выполнять по нормативным документам.

## **2. МАГНИТОПОРОШКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ**

**2.1.** МПД предназначена для выявления поверхностных и подповерхностных несплошностей металла (трещин, закатов, флокенов и т.п.) изделий из ферромагнитных сталей с относительной магнитной проницаемостью не менее 40.

**2.2.** Чувствительность магнитопорошкового метода определяется следующими характеристиками:

- магнитной индукцией стали  $B$ ;
- остаточной магнитной индукцией стали  $B_r$ ;
- коэрцитивной силой стали  $H_c$ ;
- шероховатостью контролируемой поверхности;
- формой и размером контролируемого объекта;
- напряженностью намагничивающего поля;
- толщиной немагнитных покрытий;
- ориентацией намагничивающего поля по отношению к плоскости несплошности металла;
- качеством дефектоскопических средств;
- освещенностью контролируемой поверхности.

**2.3.** В зависимости от размеров выявляемых поверхностных несплошностей устанавливаются три условных уровня чувствительности, определяемых минимальной шириной и протяженностью условного дефекта, которые приведены в таблице М.2.

**2.4.** Необходимость и объем МПД, а также нормы оценки качества и уровень чувствительности контроля конкретных изделий устанавливаются в отраслевой нормативно-технической документации на контроль изделий.

Контроль корпусов турбин обычно проводят на уровне чувствительности "Б".

**Таблица М.2**

Условный уровень чувствительности	Минимальная ширина раскрытия условного дефекта, мм	Минимальная протяженность условного дефекта, мм	Шероховатость контролируемой поверхности $R_z$ , мкм
А	2,0	0,5	2,5
Б	10,0	0,5	10,0
В	25,0	0,5	10,0

**2.5.** Магнитопорошковый контроль проводится по техническим картам контроля.

**2.6.** Для контроля магнитопорошковым методом используется следующая аппаратура:

- универсальные (стационарные, передвижные, переносные) и специализированные магнитопорошковые дефектоскопы;
- источники освещения контролируемой поверхности;
- приборы для измерения напряженности намагничивающего поля и (или) тока с погрешностью измерения не более 10 %, концентрации магнитной суспензии, освещенности контролируемой поверхности;
- размагничивающие устройства и приборы для оценки уровня размагниченности;
- контрольные образцы;
- другая вспомогательная аппаратура и средства контроля.

**2.7.** Дефектоскопы, в которых намагничивание изделий осуществляется переменным, выпрямленным или импульсным токами, при контроле способом остаточной намагниченности должны обеспечивать выключение тока в момент времени, при котором значение остаточной индукции составляет не менее 0,9 ее максимального значения для данного материала при выбранном режиме.

**2.8.** Дефектоскопы общего назначения должны обеспечивать возможность размагничивания объектов контроля.

**2.9.** Измерительные приборы, применяемые при контроле, подлежат периодической поверке службами метрологии и стандартизации.

**2.10.** В качестве индикаторов несплошностей при МПД используются черные или цветные магнитные порошки или их суспензии со следующим диапазоном зернистости:

- для суспензии — не более 50 мкм;
- для сухого способа — не более 150 мкм.

**2.11.** Каждая партия материалов для дефектоскопии должна быть проконтролирована.

Допускается входной контроль качества (выявляющей способности) магнитных порошков проводить с помощью прибора АКС-ИС (анализатора концентрации суспензии).

**2.12.** При приготовлении магнитной суспензии содержание черного или цветного порошков в дисперсной среде должно соответствовать рекомендации производителя порошка, указанной в руководстве по его применению. В случае отсутствия рекомендации производителя содержание черного магнитного порошка в 1 л дисперсной среды должно составлять  $(25 \pm 5)$  г. Составы магнитных суспензий приведены в действующей нормативной документации.

**2.13.** В качестве дисперсной среды для приготовления магнитных суспензий применяются: вода, керосин, масло и смесь керосина с маслом.

В состав водных суспензий должны входить поверхностно-активные, антикоррозионные и антивспенивающие компоненты.

**2.14.** Вязкость дисперсной среды суспензии не должна превышать  $36 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с (36 сСт) при температуре контроля. При вязкости носителя выше  $10 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с (10 сСт) в производственно-технической документации должно быть указано время стекания основной массы суспензии, после которого допустим осмотр изделия.

**2.15.** Водную магнитную суспензию необходимо оберегать от масла, которое вызывает коагуляцию магнитного порошка, что снижает ее чувствительность к выявлению несплошностей.

**2.16.** Концентрация магнитной суспензии перед проведением контроля проверяется на контрольном образце с несплошностями, удовлетворяющими заданному уровню чувствительности контроля.

Методика изготовления и аттестации контрольных образцов приведены в утвержденных нормативных документах.

**2.17.** Допускается в качестве ДМ применять магнитные пасты для приготовления суспензии. Пасты содержат все необходимые компоненты, в том числе антикоагулянты, и при размешивании в воде образуют готовую к применению суспензию.

**2.18.** Перед проведением МПД необходимо:

- подготовить поверхность и оценить ее пригодность к контролю;
- проверить работоспособность дефектоскопа;
- проверить качество дефектоскопических материалов.

**2.19.** Поверхность, подлежащая контролю, должна быть очищена от загрязнений.

**2.20.** Выявленные при визуальном осмотре дефекты должны быть устранены до проведения МПД.

Шероховатость контролируемой поверхности должна соответствовать значениям, указанным в таблице М.2.

**2.21.** МПД допускается проводить на объектах после нанесения немагнитного покрытия (например, окраски), если толщина покрытия не превышает 20 мкм.

**2.22.** Поверхность, подлежащая контролю и имеющая следы масла или жиросодержащих суспензий, обезжиривается, если контроль проводится с использованием водной магнитной суспензии, и дополнительно просушивается, если контроль проводится сухим способом. При необходимости (например, для объекта контроля с темной поверхностью) наносится контрастное покрытие.

**2.23.** Проверка работоспособности дефектоскопов и качества ДМ осуществляется с помощью измерителей напряженности поля и (или) тока, контрольных образцов и приборов для измерения концентрации суспензии.

**2.24.** При проведении МПД выполняются следующие операции:

- выбор способа и режима контроля;
- намагничивание объекта контроля;
- нанесение магнитного индикатора;
- оценка результатов контроля;

- отметка дефектного места;
- размагничивание объекта контроля (при необходимости).

2.25. Выбор способа и режима МПД проводится в зависимости от магнитных свойств контролируемого металла и требуемой чувствительности. Магнитопорошковый контроль осуществляется способом остаточной намагниченности и (или) способом приложенного поля.

2.26. Для оценки возможности применения способа остаточной намагниченности следует пользоваться графиком определения способа контроля, приведенным в действующей нормативной документации.

2.27. При невозможности использования способа остаточной намагниченности и при необходимости проведения контроля с более высоким уровнем чувствительности следует применять способ приложенного поля.

2.28. Значения напряженности поля насыщения марок стали приведены в таблице М.3.

**Таблица М.3**

Марка стали	Остаточная магнитная индукция $B_r$ , Т	Коэрцитивная сила $H_c$ , А/см	Поле насыщения $H_{нас}$ , А/с
15Х1М1ФЛ	1,4	5,3	80
12ХМ	1,6	3,6	50
20ХМ	1,2	5,3	50
20ХМФА	1,3	6,4	60

2.29. Для контроля материалов, коэрцитивная сила которых  $H_c > 10$  А/см и остаточная магнитная индукция  $B_r > 0,5$  Т, могут применяться оба способа.

2.29.1. При контроле способом приложенного поля напряженность магнитного поля, необходимая для обеспечения требуемого уровня чувствительности, определяется исходя из коэрцитивной силы  $H_c$  материала объекта контроля по кривым, соответствующим условным уровням чувствительности, или рассчитывается по формулам  $42 + 1,3H_c$ ;  $20 + 1,1H_c$ ;  $15 + 1,1H_c$  соответственно.

2.29.2. Значения напряженности магнитного поля могут быть уточнены экспериментально.

2.29.3. Намагничивание контролируемого объекта может проводиться циркулярным продольным (полюсным) или комбинированным видами с использованием переменного, выпрямленного и импульсного тока или магнитного поля.

2.30. С целью исключения пропуска несплошности в местах стыковки контролируемых участков каждый последующий намагничиваемый участок должен перекрывать предыдущий на ширину не менее 30 мм.

2.31. При контроле изделий в продольном магнитном поле в разомкнутой магнитной цепи необходимо учитывать влияние на чувствительность контроля размагничивающего фактора, связанного с формой изделия.

2.32. Контроль корпусов турбин, как правило, выполняется способом приложенного поля, так как материал корпусов относится к магнитомягким материалам.

Намагничивание выполняется циркулярное или полюсное.

2.33. Циркулярное намагничивание производится пропусканием через контролируемое изделие постоянного или переменного тока, или импульсного.

2.34. При протекании тока имеет место цепь из одного витка, что требует очень больших токов (1110 – 1200 А для переменного и до 600 А для постоянного тока). Источники тока (например, ДМП-2) крупногабаритные, тяжелые аппараты. В местах подключения (прижатия) электродов к контролируемому объекту очень часто возникают прижоги, вызывающие локальные растрескивания. После такого контроля необходима зашлифовка мест электрического контакта. При ручном контроле не спасают от прижогов защитные наконечники, например, цинковые, свинцовые.

2.35. Намагничивание следует проводить с шагом 200×200 мм. Каждая площадка намагничивается в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Наиболее четко выявляются дефекты, ориентированные вдоль линии пропускания тока. В процессе контроля следует контролировать ток намагничивания. Криволинейные поверхности не препятствуют каче-

ственному проведению контроля. Физическая трудоемкость и электрическая опасность требуют выполнения работ звеном из трех человек (один выполняет функцию наблюдающего).

**2.36.** Полюсное намагничивание обычно выполняется электромагнитом или постоянным магнитом. Для обеспечения высокой чувствительности необходимо снижать магнитные потери за счет зазора между изделием и полюсным наконечником. В этой связи применяют магниты с шарнирными (подвижными) магнитопроводами и профильными полюсными наконечниками по форме контролируемого объекта. Иногда полюсные наконечники выполняют в виде подпружиненных стержней, которые при прижиме магнита принимают форму поверхности. Из промышленных аппаратов следует отметить переносной комплект ПМД-70 с питанием от сети переменного тока или аккумуляторов, равных 27 В.

Намагничивание каждого участка выполняется в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

**2.37.** Как пример современной разработки рекомендуется комплект МАГЭКС, разработанный Институтом электро-сварки им. Е.О. Патона (г. Киев). Магнит выполнен на базе постоянных магнитов, имеется регулировка напряженности магнитного поля, предусмотрено проведение размагничивания. Магнитопровод шарнирный, размер полюсных наконечников мал (ширина наконечников вдоль магнита — 15 мм) и обеспечивает хороший контакт на криволинейных поверхностях за счет шарниров.

**2.38.** Допускается выполнять контроль самодельным электромагнитом. Этот электромагнит не сложен в изготовлении, но имеет большое сечение в полюсных наконечниках.

**2.39.** Магнитный индикатор на контролируемую намагниченную поверхность наносится сухим или мокрым способом в виде порошка или суспензии соответственно.

**2.40.** Магнитный индикатор на контролируемую поверхность при контроле способом приложенного магнитного поля наносится одновременно с намагничиванием объекта контроля. Намагничивание прекращается после стекания с контролируемой поверхности основной массы суспензии. Осмотр



контролируемой поверхности проводится после прекращения намагничивания.

**2.41.** При контроле способом остаточной намагниченности магнитный индикатор наносится на контролируемую поверхность после снятия намагничивающего поля, но не позднее чем через 1 ч. Осмотр контролируемой поверхности проводится после стекания основной массы суспензии.

**2.42.** Результаты контроля оцениваются по наличию на контролируемой поверхности индикаторного следа в виде четкого плотного валика магнитного порошка, видимого невооруженным глазом или с использованием лупы до 7-кратного увеличения, и воспроизводимости каждый раз при повторном нанесении магнитной суспензии или порошка без учета принадлежности его к поверхностной или подповерхностной несплошности. При этом длина индикаторного следа линейной несплошности равна протяженности выявленной несплошности.

**2.43.** Освещенность контролируемой поверхности при использовании черных и цветных магнитных порошков должна быть не менее 1000 лк.

**2.44.** К ложным индикаторным следам относятся:

- индикации, вызванные контактом с другим ферромагнитным материалом или магнитом, исчезающие после размагничивания;
- размытые нечеткие индикации, вызванные местными изменениями магнитных свойств металла;
- индикации в виде широких групп мелких и параллельных осадений порошка, вызванные избыточным намагничивающим полем.

**2.45.** Контроль МПД рекомендуется выполнять по действующей нормативной документации.

### **3. ВИХРЕТОКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ**

**3.1.** Электромагнитный метод или метод вихревых токов — вихретоковая дефектоскопия (ВД) неразрушающего контроля основана на возбуждении вихревых токов в поверхностном электропроводящем слое объекта контроля и регистрации

изменений электромагнитного поля вихревых токов, вызванных наличием дефектов в изделии.

Метод предназначен для выявления трещин усталости, металлургических, термических, шлифовочных трещин и других несплошностей (расслоения, закаты, плены, раковины и т.д.) в поверхностных слоях изделий из немагнитных и ферромагнитных материалов и сплавов, в том числе и для выявления дефектов, расположенных под неэлектропроводящим покрытием.

Особенность данного метода состоит в том, что на сигналы практически не влияют влажность, давление и загрязненность газовой среды, радиоактивные излучения и незначительное загрязнение поверхности объекта контроля непроводящими веществами.

**3.2.** ВД позволяет контролировать изделия различных конфигураций, размеров и форм.

**3.3.** Размер минимального дефекта, который может быть выявлен данным методом, определяется:

- чувствительностью применяемого дефектоскопа;
- характером дефекта;
- характеристиками контролируемого изделия;
- условиями контроля.

**3.3.1.** Основным показателем электромагнитных дефектоскопов, характеризующих их возможности, является чувствительность, т.е. способность выявлять дефекты определенных размеров. Размеры дефектов определяются их глубиной, протяженностью (длиной), раскрытием.

**3.3.2.** Выявляемость дефекта, при прочих равных условиях, зависит от его типа. Наилучшим образом выявляются дефекты типа усталостных трещин, ориентированные перпендикулярно контролируемой поверхности.

Заполнение полости дефекта грязью, нагаром, неэлектропроводящими окислами и т.п. не приводят к снижению их выявляемости.

**3.4.** ВД проводится по технологическим картам контроля.

**3.5.** Для контроля ВД используются стационарные, передвижные и переносные дефектоскопы.

**3.6.** Преобразователи к дефектоскопам конструктивно выполняются в виде катушек индуктивностей, устанавливаемых в специальные оправки, размеры и форма которых выбираются в зависимости от конфигурации контролируемых участков изделий.

**3.7.** Для контроля сложных форм рекомендуется применять специальные преобразователи, которые должны быть апробированы в реальных условиях контроля.

**3.8.** В дефектоскопах должны быть использованы три вида сигнализации в различных комбинациях: аналоговая (стрелочная, электронно-лучевая), пороговая (звуковая, световая) и звуковая переменнo-тональная.

**3.9.** Для отображения аналоговой сигнализации может быть использован стрелочный индикатор, отклонение стрелки которого находится в зависимости от параметров выявляемых дефектов, или электронно-лучевая трубка, по виду фигур на экране которой судят о характере и параметрах дефекта.

Для улучшения состояния сигнал-помеха может быть использована звуковая переменнo-тональная сигнализация.

**3.10.** При проведении ВД используются:

- электромагнитные дефектоскопы с преобразователями и кабелями;
- образцы.

**3.11.** Дефектоскопы и образцы должны быть аттестованы и проходить государственную или ведомственную поверку, а также проверку их состояния перед началом работы. Контрольные образцы должны проходить аттестацию и поверку.

**3.12.** Для проверки пороговой чувствительности дефектоскопов, дефектоскопических установок должны применяться первичные контрольные образцы с искусственными или естественными дефектами, размеры которых соответствуют пороговой чувствительности.

Первичные контрольные образцы должны быть изготовлены из материала с теми же электромагнитными свойствами и иметь то же качество поверхности, что и контролируемое изделие.

**3.13.** Вторичные контрольные образцы служат для разработки методики контроля, проверки работоспособности и

настройки дефектоскопа. Они должны иметь дефекты, характеризующие предел реальной чувствительности дефектоскопа в конкретном случае контроля.

В качестве вторичных контрольных образцов применяются детали или участки деталей, имеющие характерные дефекты, выявленные ранее любыми другими методами.

При отсутствии дефектных деталей в качестве вторичных контрольных образцов следует применять образцы с искусственными дефектами, выполненными по специальной методике.

При этом следует учитывать, что искусственные дефекты типа прорези выявляются хуже, чем естественные дефекты с теми же параметрами.

**3.14.** Перед проведением контроля поверхность контролируемого изделия в зоне перемещения преобразователя должна быть очищена.

Допускается проведение контроля по необработанной поверхности изделия при условии достижения заданной чувствительности (порогового уровня).

**3.15.** Сканирование в процессе контроля осуществляется, как правило, перпендикулярно предполагаемому направлению развития дефекта. При невозможности осуществления такого сканирования допускается проводить контроль путем сканирования под углом к направлению предполагаемого дефекта. Шаг сканирования выбирается с учетом требуемой чувствительности контроля и направления сканирования преобразователя относительно возможного направления сканирования преобразователя относительно возможного направления развития предполагаемого дефекта, а также при необходимости выявления минимальных по длине дефектов, шаг сканирования не должен превышать половины длины дефекта, выявляемого при настройке дефектоскопа на вторичном образце. При контроле деталей сложной конфигурации, а также в случае особо трудных условий контроля шаг сканирования выбирается минимально возможным.

**3.16.** Максимально допустимая скорость контроля зависит от типа используемого дефектоскопа. Скорость контроля с помощью дефектоскопов, имеющих только стрелочную

индикацию дефекта, не должна превышать 5 мм/с, имеющих звуковую пороговую сигнализацию или световую безынерционную сигнализацию (светодиоды), позволяет увеличивать скорость контроля до 10-20 мм/с. При применении дефектоскопов, имеющих сигнализацию с запоминанием, скорость контроля не ограничивается.

**3.17.** Краевой зоной считаются участки контролируемой поверхности шириной в 1-1,5 эффективных диаметра преобразователя, прилегающие к краям контролируемой детали. Приближение преобразователя в процессе контроля к краевой зоне, а также изменение расстояния между преобразователем и краями детали и т.п. вызывает расстройку прибора.

**3.18.** Контроль краевой зоны детали должен проводиться путем перемещения преобразователя вдоль края при сохранении постоянства расстояния от центра преобразователя до края, используя при этом специальные упоры и насадки на преобразователь.

При необходимости выявления в краевой зоне дефектов минимальных размеров, расстояние центра преобразователя от края в процессе контроля должно быть равным 0,5 эффективного диаметра преобразователя.

**3.19.** Настройка дефектоскопа для контроля краевой зоны должна осуществляться при установке преобразователя на том же расстоянии от края, при котором будет проводиться контроль. При необходимости проведения контроля на разных расстояниях от края, его нужно осуществлять последовательно при различных настройках.

Проверка правильности выбора места настройки (бездефектности выбранного места) проводится путем смещения преобразователя только в одном направлении — вдоль края.

**3.20.** О нахождении дефекта непосредственно в зоне влияния преобразователя, когда сигнал превышает или равен заданному порогу чувствительности прибора, свидетельствуют следующие признаки:

— скачкообразное увеличение показаний стрелочного индикатора с последующим возвратом в первоначальное положение или изменением фигуры на экране электронно-лучевой трубки;

— кратковременное (или с заданным временем задержки) загорание светового индикатора;

— кратковременное возникновение звукового сигнала (в дефектоскопах с пороговой сигнализацией);

— скачкообразное изменение тона звукового сигнала (в дефектоскопах с переменнo-тональной сигнализацией).

**3.21.** В дефектоскопах, имеющих несколько видов сигнализации, наличие дефекта должно вызывать их одновременное срабатывание.

Максимальная реакция систем сигнализации на дефект будет наблюдаться в момент, когда он полностью пересекает зону влияния преобразователя.

**3.22.** Характер срабатывания сигнализации зависит от угла встречи преобразователя с направлением развития дефекта. Если траектория движения преобразователя при сканировании изделия совпадает с направлением развития дефекта, то продолжительность срабатывания аналоговой системы индикации (при выбранной скорости перемещения преобразователя) будет определяться длиной трещины, а угол отклонения стрелки — ее глубиной. Если траектория движения преобразователя будет перпендикулярна направлению развития трещины, то продолжительность срабатывания аналоговой системы индикации будет зависеть от эффективности диаметра преобразователя, а отклонение стрелки индикатора — от глубины трещины. Продолжительность срабатывания пороговой сигнализации будет определяться также выбранным уровнем порога чувствительности.

**3.23.** При перемещении преобразователя вдоль предполагаемого дефекта признаком его наличия является резкое срабатывание всех видов сигнализации в момент попадания начала дефекта в зону влияния преобразователя.

**3.24.** Плавное увеличение показаний стрелочного индикатора или изменение фигуры на экране электронно-лучевой трубки, а также изменение тона звуковой переменнo-тональной сигнализации не является признаком дефекта, а свидетельствует о наличии зон структурной или магнитной неоднородности, об изменении толщины стенки, конфигурации изделия и т.п. В этих случаях о наличии дефекта

можно судить по скачкообразному изменению тона переменнотональной звуковой сигнализации, что позволяет выявлять дефект даже при наличии мешающих факторов, приводящих к значительному отклонению стрелки индикатора, перемене фигуры и срабатыванию системы пороговой сигнализации.

**3.25.** Если контроль проводился с применением преобразователя большого диаметра, то определение границ распространения трещины должно уточняться датчиком с минимальным размером преобразователя.

**3.26.** При определении протяженности выявленного дефекта следует учитывать, что дефект начинает влиять на преобразователь, когда его начало или конец находятся на расстоянии, равном половине эффективного диаметра преобразователя. Поэтому для определения протяженности дефекта необходимо установить преобразователь в положение, при котором сигнализация дефектоскопа фиксирует начало дефекта и, перемещая его "змейкой" вдоль дефекта, определить положение преобразователя, соответствующее окончанию дефекта. Расстояние между этими двумя положениями преобразователя, определенное по его центру, и является протяженностью дефекта.

**3.27.** Так как чувствительность электромагнитных дефектоскопов ограничена (не выявляют дефекты глубиной 0,05 мм), а конец трещины имеет малую глубину и может быть не выявлен дефектоскопом, то при различных технологических операциях по выявлению дефектов необходимо протяженность, измеренную с помощью дефектоскопа, несколько увеличить.

**3.28.** Если протяженность трещины определяется под слоем покрытия, то для более точного определения ее протяженности покрытие должно быть снято и настройка прибора проведена на участке без покрытия.

## **4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ МЕТОДА КОНТРОЛЯ КОРПУСОВ ТУРБИН**

Все описанные три метода позволяют обнаруживать трещины в корпусах турбин на одинаковом уровне чувствительности.

**4.1.** Метод ЦД трудоемкий, но позволяет выполнять контроль во всех пространственных положениях. При контроле больших площадей применение метода эффективно. Метод

практически не дает ложных забракований, чувствительность метода в значительной степени зависит от шероховатости поверхности вплоть до невозможности вести контроль на грубо обработанной поверхности. Для выполнения работ требуются расходные материалы. Метод выявляет поверхностные дефекты в любых металлах, пластмассах, фарфоре и т.д.

**4.2.** Метод МПД менее трудоемок, высокопроизводителен, выявляет дефекты как поверхностные, так и подповерхностные. Выявление дефектов мокрым способом в потолочном положении затруднительно. Метод дает ложные забракования. Перебраковка может достигать до 50 % и более. Известны случаи перебраковки до соотношения недопустимые дефекта (брак): ложное забракование – 1:1. Чувствительность метода зависит от шероховатости контролируемой поверхности, но в меньшей степени, чем КД. Для выполнения работ требуются расходные материалы. Метод применим только для контроля ферромагнитных сталей.

**4.3.** Метод ВД прост. По производительности уступает МПД, но компенсируется низкими требованиями к качеству поверхности. Метод позволяет контролировать поверхности в любом пространственном положении. Метод может давать ложные забракования, но меньше, чем МПД. В отличие от КД и МПД метод ВД позволяет контролировать не только поверхность металла, но и в объеме, и в этой связи измерять глубину трещины.

Краевой эффект, являющийся слабым местом ВД, может быть скомпенсирован специальными регулировками прибора.

## **5. ПОДТВЕРЖДЕНИЕ НАЛИЧИЯ ДЕФЕКТОВ И ИХ УДАЛЕНИЯ**

Подтверждение наличия дефектов и контроль полноты его удаления производятся травлением.

От многих указанных недостатков свободен метод вихревых токов, который рекомендуется внедрять, учитывая, что в последнее время имеется много интересных практических физико-механических разработок НПО "Спектр" (г. Москва) и других организаций.



## П р и л о ж е н и е Н

### ИЗМЕРЕНИЕ ГЛУБИНЫ ТРЕЩИН В КОРПУСАХ ТУРБИН

#### 1. ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

##### 1.1. Измерение с помощью ультразвука

###### 1.1.1. Головные волны.

Головные или боковые (подповерхностные) волны образуются при углах ввода близких к первому критическому углу и характерны тем, что распространяются прямолинейно в слое толщиной 15–20 мм, не выходя на поверхность изделия. При этом рельеф изделия не оказывает на них влияние. Затухание волн незначительное.

Принцип измерения заключается в том, что специальный преобразователь (излучатель) излучает головную волну в направлении трещины. Волна принимается другим специальным преобразователем (приемником), ориентированным навстречу излучателю. Если трещины на пути волны нет, то принятый сигнал имеет некоторое максимально возможное для данного случая значение.

При наличии трещины сигнал уменьшается пропорционально глубине трещины. Когда глубина трещины превышает толщину слоя, в котором распространяется волна, дальнейшие измерения не возможны.

Метод позволяет измерять глубину трещин от 2–3 мм до 10–15 мм, что определяется размерами пьезопластин и углами ввода.

Прием позволяет эффективно вести измерения на плоских поверхностях. На криволинейных поверхностях (радиусных переходах) таким способом затруднительно выполнять измерения, а при резких закруглениях — невозможно. Во всех случаях перед измерениями следует составить схему прозвучивания и определить возможность выполнения измерений.

###### 1.1.2. Поверхностные волны.

Глубокие, более 8–10 мм, трещины можно измерить с помощью специальных преобразователей, излучающих поверх-

ностные УЗ-волны вдоль трещины. Волна распространяется вдоль трещины до ее конца и возвращается в преобразователь. Измерив время распространения волны и зная ее скорость в материале отливки, легко определить глубину трещины.

Преобразователи для головных и поверхностных волн могут быть изготовлены в НПО ЦНИИТМАШ (г. Москва).

### 1.1.3. Волны дифракции.

Метод позволяет измерять трещины глубиной 2 мм и более за счет излучения вершиной трещин волн дифракции, которые возникают при облучении вершины трещины. Реализуется метод путем облучения вершины трещины наклонным преобразователем и приема дифрагированной волны прямым (нормальным) или наклонным преобразователем. После построения схемы прозвучивания по результатам измерений графически рассчитывается расстояние до вершины трещины, а зная толщину изделия в месте контроля, можно определить и глубину трещины.

Возможность применения метода следует оценивать по анализу конкретных условий: конфигурации поверхности, доступности, возможности зачистки.

Для того, чтобы применить описанный прием, требуется плоская площадка над трещиной, со стороны которой можно установить преобразователи. Возможны измерения на цилиндрических поверхностях.

Существует особенность: контроль выполняется на высокой чувствительности, когда разность донных сигналов и сигнала от дифрагированной волны составляет более 12 дБ.

При выявлении трещины требуется сканировать преобразователями для получения максимума сигналов.

Перед контролем необходимо проверить преобразователи и измерить точно точки ввода, углы ввода, что необходимо для расчетов.

При малой глубине трещин 2–4 мм более эффективно применение пары наклонных преобразователей, при большей глубине — сочетание наклонного преобразователя (излучатель) и нормального (приемник).

Для выполнения расчетов следует измерить диаграмму направленности преобразователей и знать углы, под которыми идет максимум излучения.

При измерениях фиксируются положения преобразователей при максимумах эхо-сигналов.

## **1.2. Измерение электропотенциальным методом**

Электропотенциальный метод (ЭПМ) относится к электрическим методам контроля (ЭМК) и основан на регистрации падения потенциала. В практике контроля метод известен более 60 лет. При приложении к металлическому телу электрического напряжения, в нем образуется электрическое поле. Если напряжение стабилизировано, то поле будет также стабильным. Геометрическое место точек с одинаковым потенциалом составляет эквипотенциальные линии. Electroды, с помощью которых создается поле, называются токовыми.

Разность потенциалов на достаточном расстоянии от токовых электродов зависит от трех факторов: электропроводимости, геометрических размеров токонесущего изделия и трещин. Особенно на это влияют трещины на поверхности. Если с помощью двух других электродов, называемых потенциальными, измерять разность потенциалов на участках, расположенных между токовыми электродами, то значение разности потенциалов будет зависеть от толщины изделия и наличия трещин.

При наличии трещин снижается площадь поперечного сечения, занятого линиями тока, и изменяется разность потенциалов по сравнению с участком, где трещин нет. Между глубиной трещин и разностью потенциалов при неизменности других факторов (материал изделия, его форма, расстояние между электродами, значение и стабильность напряжения на токовых электродах и т.д.) существует корреляционная зависимость.

Таким образом ЭПМ можно рекомендовать для измерения глубины трещин в корпусах турбин.

Однако, точность измерений в большой степени зависит от переходного сопротивления в месте подключения электродов, прежде всего — токовых. На точность измерения влияет соответствие формы, размеров и материала калибровочных образцов и реального изделия. Сложность при измерении глубины трещин в отливках заключается в том, что чем

толще отливка, тем хуже точность измерения толщин малой глубины. На точность измерения влияет термо-э.д.с., возникающая между потенциальными электродами.

Определенную сложность представляют схемы измерения потенциалов: уровень измеряемого напряжения 30 – 100 мкВ. На точность измерения влияет зависимость расстояния между потенциальным электродом и трещиной и высотой трещины, и т.д.

Эта задача решается специалистами в области электрических методов неразрушающего контроля.

Принципиально для измерения глубины трещин ЭПМ специальных приборов не требуется. Измерение разности потенциалов можно выполнять стандартной схемой с нуль-гальванометром. В качестве источника питания можно использовать стабилизированные низковольтные источники с током не менее 10 А. Основное в измерениях – наличие соответствующих образцов, копирующих изделие.

Из интересных решений применения ЭПМ следует отметить наблюдение за развитием трещины в процессе эксплуатации с помощью электродов, приваренных к корпусу в месте трещины и выведенных через изоляцию.

### **1.3. Измерение вихретоковым методом**

В широкой практике контроля, применяемого в энергетике, вихретоковые приборы в основном используются для поиска дефектов, т.е. они настраиваются в силу их схемных решений так, что при обнаружении незначительной по глубине трещины, индикатор прибора резко отклоняется, так как трещины недопустимы.

Вместе с тем, зная изменение полного сопротивления и частоту, вихретоковым методом можно определять толщину изделий и глубину трещин. Такие приборы существуют, например ИГТ-2, разработки ОАО ВТИ, измеряющий глубину трещин до 10 мм, семейство портативных приборов разработки НПО "Спектр" г. Москва, например ВД-82Н.

Вихретоковый метод имеет ряд преимуществ:

– контроль и измерение можно выполнять по грубо обработанной поверхности;

– малые размеры датчиков позволяют выполнять измерения на криволинейных поверхностях.

К недостаткам, ограничивающим применение, следует отнести влияние краевого эффекта.

## **2. МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ**

2.1. Глубина трещины оценивается путем 2–3-х сверлений  $\Phi$  12-16 мм в средней части зоны растрескивания.

2.2. Ориентировочное определение глубины трещины  $h_T$  допускается по ее протяженности  $L_T$ . При этом принимается соотношение  $h_T = 0,2 L_T$ .

## П р и л о ж е н и е П

### ПОРЯДОК ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛА РОТОРОВ

1. Для принятия решения о продлении срока эксплуатации ротора сверх паркового ресурса или о временной эксплуатации ротора, содержащего недопустимые дефекты, проводятся исследование микроструктуры и измерение твердости металла.

2. При отсутствии недопустимых дефектов исследование микроструктуры и измерение твердости проводятся на металле полотна или обода диска первой по ходу пара (наиболее высокотемпературной) ступени. Для сравнения измерение твердости проводится на том же радиусе на металле диска последней (наиболее низкотемпературной) ступени цельнокованой части ротора. Допускается проводить исследование микроструктуры на сколе (спиле), взятом от острой кромки паза под балансировочные грузы (где он имеется). Объем скола не должен превышать  $0,2 \text{ см}^3$ .

3. При выявлении недопустимых дефектов вблизи осевого канала ротора (изготовленного из сталей Р2, Р2МА, 34ХМА) исследование микроструктуры проводится на полумуфте (на ее образующей и на торце вблизи осевого канала).

4. Шлифы приготавливаются путем 3–5-кратной механической полировки и травления. Травление шлифов производится 4–6%-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Качество протравленного шлифа контролируется с помощью переносного микроскопа при увеличении не ниже  $\times 100$ . Анализ микроструктуры проводится методом полистироловых или иных реплик (на сколах — в лабораторных условиях при исследовании шлифа). В качестве растворителя полистироловых реплик применяется бензол или толуол. После высыхания и отделения реплики исследуются и фотографируются в лабораторных условиях на металлографическом микроскопе при увеличениях  $\times 100$  и  $\times 500$ .

Рекомендуется для увеличения отражательной способности и контраста изображения на поверхность реплики напыляется в вакууме слой алюминия или хрома толщиной  $100–300 \text{ \AA}$ .

5. При анализе микроструктуры металла высокотемпературной зоны ротора исследуется вид и степень сфероидизации второй структурной составляющей, распределение и

размер карбидов, размер первичного зерна, количество структурно свободного феррита. Результаты исследования сравниваются с критериями, приведенными в п. 6.1.2.7 настоящей Инструкции и используются при выборе служебных свойств стали для расчета ресурса ротора.

6. При анализе микроструктуры на торце ротора определяется количество структурно свободного феррита, и по данным исследования в двух зонах полумуфты методом экстраполяции рассчитывается его количество на поверхности осевого канала. Содержание свободного феррита вблизи поверхности осевого канала в районе бочки ротора примерно в 2 раза больше, чем вблизи осевого канала на полумуфте. Количество структурно свободного феррита используется для оценки вязкости разрушения стали  $K_{Ic}$  и критического размера дефекта в металле ротора, в котором выявлены недопустимые дефекты.

7. Твердость измеряется, как правило, в местах приготовления металлографических шлифов на дисках высоко- и низкотемпературной ступеней. Твердость рекомендуется измерять переносными приборами типов ВПИ-2, ВПИ-ЗК, ТЕМП-1, прибором Польди (менее предпочтительно) и др. Диаметры отпечатков (если требуется) измеряются с помощью переносного микроскопа или методом полистироловых реплик с последующим измерением диаметров в лабораторных условиях на инструментальном микроскопе. Результаты измерения твердости усредняются не менее, чем по трем замерам для каждой зоны ротора.

8. Значения твердости металла высокотемпературной ступени ротора сравниваются с критериями, приведенными в п. 6.1.2.8 настоящей Инструкции. Различие в твердости металла высоко- и низкотемпературной ступеней отражает степень разупрочнения металла высокотемпературной части ротора в процессе его длительной эксплуатации и является дополнительной характеристикой, которая должна учитываться при принятии решения о возможности дальнейшей эксплуатации ротора.

9. Данные микроструктурного анализа и фотографии микроструктуры, а также результаты измерения твердости с указанием типа твердомера и описанием процедур выполненных исследований заносятся в протокол.

**ПОРЯДОК ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ  
И СВОЙСТВ МЕТАЛЛА  
ЛИТЫХ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ТУРБИН**

**1. СТРУКТУРА И ТВЕРДОСТЬ**

**1.1.** Исследование структуры литого металла осуществляется с целью выявления изменений, связанных с исчерпанием ресурса деталей в процессе эксплуатации, а также для определения характера образовавшихся трещин.

**1.2.** Характер структуры изучается на поперечных шлифах, изготовленных из спилов-лодочек (сколов) треугольного сечения площадью не менее 20 мм<sup>2</sup>. При исследовании характера трещин ее продольная ось должна быть ориентирована вдоль лодочки. В качестве дополнения к таким сколам желательно исследование структуры на шлифах непосредственно на детали в наиболее напряженных зонах. При подготовке шлифов поверхностный слой металла должен сниматься на глубину не менее 1,5 – 2,0 мм.

**1.3.** В процессе микроструктурного анализа металла оцениваются следующие параметры:

- размер ферритного зерна в соответствии с государственным стандартом;
- количество (%) и вид бейнитной или перлитной составляющих;
- балл сфероидизации второй структурной составляющей;
- особенности распределения карбидов по границам зерен и их средний размер;
- особенности распределения карбидов в ферритной матрице и их средний размер;
- загрязненность неметаллическими включениями в соответствии с государственным стандартом;
- количество и размер пор ползучести.

**1.4.** Размер пор ползучести оценивается на шлифах после 3 – 5-кратного травления 3%-ным раствором HNO<sub>3</sub> в спирте, производится осмотр не менее 10 полей зрения при увеличении ×500.



**1.5.** С учетом экспериментально установленного влияния поверхностного слоя литого корпуса и качества подготовки поверхности на показания переносных приборов, для получения более достоверных данных по твердости рекомендуется удалить слой металла толщиной 1,5-2,0 мм. Число измерений должно зависеть от того, проведено ли снятие поверхностного слоя, а также от характера обработки поверхности. В частности, при использовании переносных приборов с относительно неглубоким внедрением шарика (менее 0,2 мм), например типа ТЭМП-1, рекомендуется следующее число измерений в зависимости от качества поверхности:

- полированная — 5;
- тонкошлифованная поверхность — не менее 10;
- грубошлифованная — не менее 16;
- зачистка шкуркой до полного удаления окалина — не менее 30.

## **2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

**2.1.** Образцы изготавливаются из вырезок, эскизы которых выдает экспертная организация. Вырезки должны отбираться из зоны детали с максимальной рабочей температурой металла. При этом эскиз вырезки разрабатывается таким образом, чтобы не был нанесен ущерб надежности детали и не потребовалась бы дополнительная подварка в зоне отбора образцов.

В случае выборки глубоких трещин (выборка большого объема металла) для получения более достоверной информации об уровне свойств в дефектной зоне, желательно получение сколов или вырезок сравнительно небольшого размера непосредственно из зоны образования трещины.

**2.2.** Типы изготавливаемых образцов для испытаний должны соответствовать государственным стандартам. Допускается изготовление образцов по стандартам экспертной организации.

## ПОРЯДОК ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЧЕТНОГО РЕСУРСА И ОЦЕНКИ ЖИВУЧЕСТИ РОТОРОВ И КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ТУРБИН

### 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. При расчетах ресурса цельнокованных роторов и литых корпусных деталей ЦВД и ЦСД должно проверяться удовлетворение критериев статической (кратковременной и длительной) и циклической прочности и накопленной поврежденности по расчетным напряжениям и деформациям в критических зонах, к которым относятся зоны с максимальными уровнями напряжений, температуры, или наиболее частым обнаружением трещин.

1.2. Для оценки ресурса роторов и корпусов выполняются расчеты температурных полей, полей упругих (условно упругих) и упругопластических напряжений и деформаций под действием механических (центробежные силы — для роторов; перепады давления, осевые усилия — для корпусов) и температурных нагрузок при основных эксплуатационных режимах работы турбины, а также напряжений и деформаций в условиях ползучести.

К основным эксплуатационным режимам, кроме стационарного режима с номинальной нагрузкой, относятся пуски из холодного, неостывшего (после суточного и двухсуточного простоев турбины) и горячего (после остановов на ночь) состояний, разгрузки с частичной нагрузкой и обратные догрузки, плановые и аварийные остановки.

1.3. Расчеты температурных полей, полей напряжений и деформаций в роторах и корпусных деталях рекомендуется выполнять на основе двумерных, осесимметричных и, в случае необходимости, трехмерных моделей теорий теплопроводности, упругости, пластичности и ползучести.

Допускается использование экспериментальных температурных полей, определяемых путем термометрии в натурных условиях при характерных режимах эксплуатации, в объеме, необходимом для последующего расчета полей напряжений.

**1.4.** Для углеродистых сталей ползучесть должна учитываться при температурах, превышающих 350 °С, для низколегированных хромомолибденовых и хромоникельмолибденовых сталей — при температурах, превышающих 420 °С, для низко- и среднелегированных хромомолибденованадиевых и хромомолибденовольфрамованадиевых сталей — при температурах, превышающих 450 °С, для жаропрочных хромистых сталей — при температурах, превышающих 480 °С.

**1.5.** Для расчета полей напряжений и деформаций с учетом ползучести используются теории старения и течения (допускается использование и других, более точных теорий ползучести) и численные методы решения соответствующих двумерных, осесимметричных и, в случае необходимости, трехмерных краевых задач теории ползучести в квазистационарной постановке (для расчета полей напряжений используются мгновенные значения нестационарных температурных полей в моменты возникновения максимальных разностей и градиентов температуры в проверяемых зонах).

**1.6.** Если расчет напряжений и деформаций с учетом установившейся ползучести выполняется с помощью теории старения и изохронных кривых, то учитывается только действие механических нагрузок, а температурные напряжения исключаются из расчета, полагая коэффициент температурного расширения  $\alpha^{\theta} = 0$ .

**1.7.** В качестве эквивалентных напряжений  $\alpha^{\theta}$ , используемых в критериях статической и циклической прочности при сложном напряженном состоянии, принимается интенсивность напряжений  $\sigma_i$ , которая в случае осесимметричной задачи определяется выражением

$$\sigma_y = \sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{\theta} - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_{\theta})^2 + 6\tau_{rz}^2}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\theta}$ ,  $\sigma_r$ ,  $\sigma_z$ ,  $\tau_{rz}$  — окружные, радиальные, осевые и касательные напряжения.

В компонентах главных напряжений выражение для  $\sigma_i$  как для осесимметричных, так и для трехмерных задач имеет вид

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (2)$$

При использовании интенсивности напряжений для оценки циклической прочности величине  $\sigma_i$  присваивается знак, равный знаку наибольшего по абсолютной величине (в рассматриваемый момент цикла) главного нормального упругого (условно упругого) напряжения из формулы (2).

**1.8.** Допускается при оценке кратковременной и длительной статической прочности использовать в качестве эквивалентного удвоенное максимальное касательное напряжение

$$\sigma_{\sigma} = 2\tau_{\max} = \max \{(\sigma_1 - \sigma_2), (\sigma_2 - \sigma_3), (\sigma_1 - \sigma_3)\}. \quad (3)$$

**1.9.** В расчетах ресурса используются характеристики длительной прочности, ползучести, малоциклового усталости и трещиностойкости роторных и корпусных сталей после длительной эксплуатации. Предпочтительнее уточнять эти характеристики для каждого конкретного объекта с использованием приближенных корреляционных зависимостей между этими характеристиками и данными по исследованию структуры и свойств металла, полученными в соответствии с разделом 3 настоящей Инструкции, а также с учетом сертификатных данных для стали в исходном состоянии.

**1.10.** При оценках времени живучести роторов и корпусов с дефектами используются константы кинетических уравнений скорости роста трещин под действием циклических нагрузок и ползучести для роторных и корпусных сталей при расчетной температуре металла на установившемся режиме работы турбины с номинальной мощностью, а значения критического коэффициента интенсивности напряжений — вязкости разрушения  $K_{Ic}$ , берутся при температуре металла в зоне дефекта в момент пуска турбины из холодного состояния, соответствующей максимальной вероятности хрупкого разрушения детали. Для корпусных деталей необходимо также проверять возможность хрупкого разрушения и на остальных переменных режимах.

## 2. РАСЧЕТНЫЕ ОЦЕНКИ СУММАРНОЙ И СРЕДНЕГОДОВОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ, НАКАПЛИВАЕМЫХ ДО И ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИЗА ВОЗМОЖНОСТИ ПРОДЛЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ

2.1. Суммарная поврежденность  $\Pi'$ , накопленная в металле до начала анализа возможности продления срока эксплуатации роторов и корпусов, работающих в условиях совместного действия ползучести при различных установившихся режимах  $q'$  типов и циклических нагрузок при различных переменных режимах  $k'$  типов, а также соответствующая поврежденность с учетом запасов (по напряжениям, деформациям, циклам и поврежденности)  $[\Pi]'$ , определяются формулами

$$\Pi' = \Pi'_{ст} + \Pi'_{ц} = \sum_{j=1}^{q'} \frac{t'_j}{t'_{pj}} + \sum_{l=1}^{k'} \frac{n'_l}{N'_{pl}}; \quad (4)$$

$$[\Pi]' = \max\{([\Pi'_{ст}]' + [\Pi'_{ц}]'), n_{\Pi} \Pi'\} = \\ = \max\left\{\left(\sum_{j=1}^{q'} \frac{t'_j}{[t_p]'_j} + \sum_{l=1}^{k'} \frac{n'_l}{[N_p]'_l}\right), n'_{\Pi} \Pi'\right\}, \quad (5)$$

где  $\Pi'_{ст}$ ,  $[\Pi'_{ст}]'$ ,  $\Pi'_{ц}$ ,  $[\Pi'_{ц}]'$  — статическая и циклическая поврежденности без учета и с учетом запасов, накопленные в проверяемой зоне ротора или корпуса до начала анализа возможности продления срока службы;

$t'_j$  — время работы на  $j$ -м установившемся режиме при температуре металла  $\theta'_j$  и эквивалентных местных напряжениях ползучести  $(\sigma'_{эj})^c_{\max}$  в проверяемой зоне ротора или корпуса (с учетом концентрации);

$t'_{pj}$  — время до наступления предельного состояния (появления трещин ползучести в проверяемой зоне) под действием эквивалентных напряжений  $(\sigma'_{эj})^c_{\max}$  при температурах  $\theta'_j$ , определяемое с помощью соответствующей диаграммы длительной прочности материала (или аппроксимирующих ее аналитических выражений);

$[t_p]''_j$  — допускаемое по условиям длительной прочности материала время работы на  $j$ -м установившемся режиме, определяемое с помощью той же диаграммы длительной прочности, что и  $t'_{pj}$ , но по эквивалентным напряжениям  $n_{\text{ДП}}^* (\sigma'_{эj})^c_{\text{max}}$ , увеличенным в соответствии с принятым коэффициентом запаса длительной прочности  $n_{\text{ДП}}^*$  для местных напряжений ползучести, где  $n_{\text{ДП}}^* = 0,9 n_{\text{ДП}}$ , а  $n_{\text{ДП}}$  — коэффициент запаса от длительной прочности для номинальных напряжений ползучести; для роторов  $n_{\text{ДП}}$  принимается в соответствии с п. 5.8.2, а для корпусов  $n_{\text{ДП}} = n'_{\text{ДП}} = 1,5$  в соответствии с требованиями п. 6.10.4;

$n'_l$  — число циклов  $l$ -го типа;

$N'_{pl}$  — число циклов до появления усталостных трещин под воздействием только циклических нагрузок  $l$ -го типа;

$[N_p]'_l$  — допускаемое число циклов при воздействии только циклических нагрузок  $l$ -го типа, определяемое в соответствии с требованиями п. 2.3;

$n'_{\text{П}}$  — запас по накапливаемой поврежденности, принимаемый в соответствии с требованиями пп. 5.8.6 и 6.10.6 для предшествующего анализу периода эксплуатации;

$q'$  — число различных типов установившихся режимов, имевших место за период до начала анализа, каждый из которых характеризуется температурой  $\theta'_j$  и установившимися эквивалентными местными напряжениями ползучести  $(\sigma'_{эj})^c_{\text{max}}$ ;

$k'$  — число различных типов циклов, имевших место за период до начала анализа, каждый из которых характеризуется своим размахом приведенных напряжений  $\Delta\sigma'_l$  или соответствующей амплитудой деформаций  $\varepsilon'_{dl}$ .

Штрихом отмечены все величины, относящиеся к периоду эксплуатации, предшествующему началу анализа.

**2.2.** При расчете накопленной к началу анализа возможности продления срока службы статической поврежденности  $P'_{ст}$  и соответствующей ей статической поврежденности с учетом запасов  $[P'_{ст}]'$  допускается разбивать всю наработку за этот период на годовые интервалы.

В этом случае  $j$ -й установившийся режим — это средне-годовой режим эксплуатации;  $q'$  — число годовых интервалов, т.е. число лет эксплуатации до начала анализа, а в качестве  $\theta'_j$  принимается температура металла, соответствующая среднегодовой температуре пара  $\theta'_{j \text{ год}}$  по данным электростанции;  $t'_j$  — наработка при этой температуре за один  $j$ -й год;  $t'_{pj}$  и  $[t_p]''_j$  — времена до наступления предельного состояния под действием среднегодовых эквивалентных напряжений ползучести  $(\sigma'_{эj})^c_{\max}$  и  $n_{\text{ДП}}^* (\sigma'_{эj})^c_{\max}$  соответственно, определяемые по диаграммам длительной прочности для каждого  $j$ -го года эксплуатации в соответствии с изменяющимися в этом году, по сравнению с другими годами, условиями эксплуатации (если в течение нескольких лет среднегодовые условия не менялись, эти годы объединяются в один временной интервал).

Величина  $\theta'_j$  для металла с учетом возможных отклонений среднегодовой температуры пара  $\theta'_{j \text{ год}}$  от номинальной определяется по формуле

$$\theta'_j = \theta'_{j \text{ год}} - (\theta_{\text{пар}}^{\text{н}} - \theta_{\text{м}}^{\text{н}}), \quad (6)$$

где  $\theta_{\text{пар}}^{\text{н}}$  — номинальная температура пара;

$\theta_{\text{м}}^{\text{н}}$  — температура металла в рассматриваемой зоне ротора или корпуса на установившемся номинальном режиме, соответствующая номинальной температуре пара.

**2.3.** Допускаемое число циклов изменения нагрузок на роторы или корпуса  $[N]_l$  (каждого  $l$ -го из рассматриваемых типов циклических нагрузок) определяется через число циклов данного типа  $N_{pl}$  до появления трещины малоциклового усталости (МЦУ) следующим образом

$$[N]_I = \min \{N_{1I}, N_{2I}\}, \quad (7)$$

- где  $N_{1I} = N_{pl}/n_N$  — число циклов до появления трещин МЦУ, соответствующее приведенной к симметричному изотермическому циклу амплитуде интенсивности деформаций  $\varepsilon_{dl}$ , деленной на коэффициент запаса  $n_N$ ;
- $N_{2I}$  — число циклов до появления трещин МЦУ, соответствующее увеличенной амплитуде интенсивности деформаций  $n_\varepsilon \cdot \varepsilon_{dl}$ ;
- $n_N$  — коэффициент запаса циклической прочности по числу циклов;
- $n_\varepsilon$  — коэффициент запаса циклической прочности по деформации;
- $N_{pl}$  — определяется по методике действующей нормативной документации с помощью экспериментальных кривых усталости для материала рассматриваемого ротора или корпуса (в этом случае  $n_N = 5$ ) или с помощью приближенных корреляционных зависимостей между числами циклов  $N_{pl}$  и амплитудами  $\varepsilon_{dl}$  (в этом случае  $n_N = 10$ ).

Коэффициент запаса по деформации принимается равным  $n_\varepsilon = 1,5$  (для корпусных деталей, изготовленных методомковки,  $n_\varepsilon = 1,25$ ).

Если по данным, представленным электростанцией, невозможно установить типы проведенных пусков (и соответствующих им циклов), а известно только их общее число  $n$  за время до момента анализа накопленной поврежденности, то накопленная циклическая поврежденность  $\Pi_{ц}$  определяется в запас по упрощенной формуле

$$\Pi_{ц} = n/N_p \text{ (или } [\Pi_{ц}] = n/[N]), \quad (8)$$

где  $N_p$  — число циклов до появления трещин МЦУ, соответствующее наиболее жесткому режиму (т.е. режиму с максимальной амплитудой деформаций  $\varepsilon_d$  в рассматриваемой зоне).

**2.4.** Прогнозируемая на последующий за анализом период эксплуатации осредненная годовая поврежденность  $\Pi_r''$ ,



которая будет накапливаться в рассматриваемой зоне ротора или корпуса при чередовании  $q''$  типов установившихся режимов, сопровождающихся ползучестью в этой зоне ( $q'' = 1; 2$ ) и  $k''$  типов переменных режимов с циклическими нагрузками ( $k'' = 3; 4$ ), а также соответствующая осредненная годовая поврежденность  $[P_r]''$  определяются формулами:

$$P_r'' = \sum_{j=1}^{q''} \frac{(t_j^r)''}{t_{pj}''} + \sum_{l=1}^{k''} \frac{(n_l^r)''}{N_{pl}''}; \quad (9)$$

$$[P_r]'' = \max \left\{ \left( \sum_{j=1}^{q''} \frac{(t_j^r)''}{[t_p]_j''} + \sum_{l=1}^{k''} \frac{(n_l^r)''}{[N_p]_l''} \right), n_{\Pi}'' P_r'' \right\}, \quad (10)$$

где  $(t_j^r)''$  — прогнозируемое время работы на установившемся режиме  $j$ -го типа в течение 1 года при эксплуатации после продления ресурса при температуре металла  $\theta_j''$  и эквивалентных местных напряжениях ползучести  $(\sigma_{эj}'')^c_{\max}$  в проверяемой зоне ротора или корпуса;

$(n_l^r)''$  — прогнозируемое осредненное число циклов  $l$ -го типа за один год при эксплуатации после продления ресурса с размахом местных эквивалентных напряжений  $\Delta\sigma_l''$  или соответствующей этому размаху амплитудой деформаций  $\varepsilon_{dl}''$  в рассматриваемой зоне;

$t_{pj}''$ ,  $[t_p]_j''$ ,  $N_{pl}''$ ,  $[N]_l''$  — величины, аналогичные описанным в п. 2.1, определяемые в зависимости от температуры металла, установившихся напряжений ползучести, размахов циклических напряжений и амплитуд деформаций в проверяемых зонах при  $q''$  типов установившихся и  $k''$  типов циклических прогнозируемых режимов на последующий за анализом (продляемый) период эксплуатации;

$n''_{\Pi}$  — запас по поврежденности на продляемый период эксплуатации (в настоящее время  $n''_{\Pi} = n'_{\Pi} = n_{\Pi}$ , определяемый в пп. 5.8.6 и 6.10.6; после накопления опыта продления индивидуального ресурса станет возможным устанавливать  $n''_{\Pi} \leq n_{\Pi}$ ).

Двумя штрихами отмечены все величины, относящиеся к периоду эксплуатации после проведения анализа и продления ресурса.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАРАБОТКИ ДО ПОЯВЛЕНИЯ ТРЕЩИН ПОЛЗУЧЕСТИ И МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ И ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

3.1. Суммарная допускаемая поврежденность с учетом запасов (по напряжениям, деформациям, циклам и поврежденности)  $[П]$ , накапливаемая за время до и после анализа возможности продления ресурса, должна удовлетворять условию

$$[П] = [П]' + [П]_{\text{ост}} \leq 1, \quad (11)$$

где  $[П]_{\text{ост}} = [П]''$  — допускаемая поврежденность, а  $[П]'$  — накопленная к началу анализа поврежденность с учетом запасов, определяемая формулой (5).

3.2. Согласно формуле (11)  $[П]_{\text{ост}}$  определяется формулой

$$[П]_{\text{ост}} \leq 1 - [П]' \quad (12)$$

(ниже знак  $<$  из формулы (12) опускается).

3.3. Остаточная допускаемая наработка, в годах, с учетом запасов по напряжениям, деформациям, циклам, поврежденности  $[G]_{\text{ост}}$  до появления трещин при комбинированном воздействии ползучести и циклических нагрузок определяется, как отношение допускаемой остаточной поврежденности  $[П]_{\text{ост}}$  к осредненной годовой поврежденности (с учетом запасов), прогнозируемой на период после анализа возможности продления ресурса  $[П_r]''$ .

Выражение для  $[G]_{\text{ост}}$  с учетом формул (5), (10), (12) определяется формулой

$$[G]_{\text{ост}} = \frac{1 - \max \left\{ \left( \sum_{j=1}^{q'} \frac{t'_j}{[t_p]_j} + \sum_{l=1}^{k'} \frac{n'_l}{[N_p]_l} \right), n'_{\Pi} \left( \sum_{j=1}^{q'} \frac{t'_j}{t'_{pj}} + \sum_{l=1}^{k'} \frac{n'_l}{N'_{pl}} \right) \right\}}{\max \left\{ \left( \sum_{j=1}^{q''} \frac{(t_j^{\Gamma})''}{[t_p]_j} + \sum_{l=1}^{k''} \frac{(n_l^{\Gamma})''}{[N_p]_l} \right), n''_{\Pi} \left( \sum_{j=1}^{q''} \frac{(t_j^{\Gamma})''}{t''_{pj}} + \sum_{l=1}^{k''} \frac{(n_l^{\Gamma})''}{N''_{pl}} \right) \right\}}. \quad (13)$$

**3.4.** Выражение для определения остаточной допускаемой поврежденности с учетом запасов только по поврежденности  $n'_{\Pi}$  и  $n''_{\Pi}$  определяется формулой

$$[G]_{\text{ост}} = \frac{1 - n'_{\Pi} \cdot \left( \sum_{j=1}^{q'} \frac{t'_j}{t'_{pj}} + \sum_{l=1}^{k'} \frac{n'_l}{N'_{pl}} \right)}{n''_{\Pi} \cdot \left( \sum_{j=1}^{q''} \frac{(t_j^{\Gamma})''}{t''_{pj}} + \sum_{l=1}^{k''} \frac{(n_l^{\Gamma})''}{N''_{pl}} \right)}. \quad (14)$$

При  $n''_{\Pi} = n'_{\Pi} = n_{\Pi}$  выражение для  $[G]_{\text{ост}}$  имеет вид:

$$[G]_{\text{ост}} = \frac{\frac{1}{n} - \sum_{j=1}^{q'} \frac{t'_j}{t'_{pj}} + \sum_{l=1}^{k'} \frac{n'_l}{N'_{pl}}}{\sum_{j=1}^{q''} \frac{(t_j^{\Gamma})''}{t''_{pj}} + \sum_{l=1}^{k''} \frac{(n_l^{\Gamma})''}{N''_{pl}}} = \frac{1 - \Pi'}{n \Pi''_{\Gamma}}. \quad (15)$$

**3.5.** Если в предшествующий началу анализа возможности продления ресурса или в последующий за этим анализом период эксплуатации отсутствовала поврежденность от ползучести или, наоборот — от циклических нагрузок (или одной из этих поврежденностей в рассматриваемой зоне можно пренебречь, по сравнению с другой), то соответствующие формулы для определения остаточной наработки  $[G]_{\text{ост}}$  получают из формул (13) — (15), полагая в них равными нулю либо  $t'_j$  и  $(t_j^{\Gamma})''$ , либо  $n'_l$  и  $(n_l^{\Gamma})''$  (возможны и другие комбинации равных нулю или пренебрежимо малых составляющих поврежденностей  $\Pi'$  и  $\Pi''_{\Gamma}$ ).

**3.6.** Если в качестве предельного принимается состояние появления трещины, то остаточная допускаемая наработка  $[G]_{\text{ост}}$  представляет собой остаточный ресурс с учетом запасов, выраженный в годах наработки.

**3.7.** Остаточная наработка до появления трещины без учета запасов  $G_{\text{ост}}$  (в годах) определяется формулой

$$G_{\text{ост}} = \frac{1 - \Pi'}{\Pi''_{\Gamma}}, \quad (16)$$

где  $\Pi'$  определяется формулой (4), а  $\Pi''_{\Gamma}$  — формулой (9).

**3.8.** Запас остаточного ресурса  $n_{\text{тоост}}$  определяется:

$$n_{\text{тоост}} = \frac{G_{\text{ост}}}{[G]_{\text{ост}}}. \quad (17)$$

**3.9.** Если известен режим эксплуатации за весь предполагаемый срок службы, то расчетные наработки (в годах) до появления трещин с учетом и без учета запасов  $[G]$  и  $G$  определяются формулами:

$$[G] = \frac{1}{[\Pi]} = \frac{1}{\max \left\{ \left( \sum_{j=1}^q \frac{t_j^{\Gamma}}{[t_{pj}]} + \sum_{l=1}^k \frac{n_l^{\Gamma}}{[N_{pl}]} \right), n_n \cdot \left( \sum_{j=1}^q \frac{t_j^{\Gamma}}{t_{pj}} + \sum_{l=1}^k \frac{n_l^{\Gamma}}{N_{pl}} \right) \right\}}, \quad (18)$$

$$G = \frac{1}{\Pi^{\Gamma}} = \frac{1}{\sum_{j=1}^q \frac{t_j^{\Gamma}}{t_{pj}} + \sum_{l=1}^k \frac{n_l^{\Gamma}}{N_{pl}}}, \quad (19)$$

где  $q$  — число типов установившихся режимов с ползучестью за весь срок службы;

$k$  — число различных типов циклического нагружения также за весь срок службы.

Если в качестве предельного принимается состояние появления трещины, то запас ресурса  $n_t$  определяется отношением:

$$n_t = \frac{G}{[G]}. \quad (20)$$

## 4. РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ЖИВУЧЕСТИ

4.1. При расчетной оценке живучести любые выявленные дефекты в роторе или корпусе (трещины, поры, металлургические и технологические дефекты и т.п.) рассматриваются как трещины — наиболее опасный тип дефектов.

4.2. Для расчетной оценки момента наступления критического состояния, предшествующего разрушению (исчерпание живучести), используется параметр механики разрушения — коэффициент интенсивности напряжений (КИН) при разрушении отрывом —  $K_I$ . Критическим считается состояние, когда максимальная по фронту трещины величина КИН при одном из возможных режимах достигает критического значения — вязкости разрушения  $K_{Ic}$ , т.е. выполняется равенство:

$$K_I = K_{Ic} \quad (21)$$

*Примечание* — Следует проверять режимы, при которых либо  $K_{I(l)}$  достигает максимального значения при данной глубине трещины  $l$ , либо  $K_{Ic}$  максимально снижено (при наиболее низком запасе рабочей температуры  $\theta$  от критической температуры хрупкости  $\theta_k$ ).

4.3. Для оценки критических размеров дефектов (трещин) рекомендуется использовать правила составления расчетных схем, разработанных НПО ЦНИИТМАШ. Поверхностные дефекты заменяются плоскими полуэллиптическими трещинами с полуосями  $l$  и  $c$  (меньшая полуось  $l$  совпадает с направлением роста трещины в глубь тела ротора или корпуса, а большая полуось  $c$  перпендикулярна к ней), подповерхностные дефекты заменяются плоскими эллиптическими трещинами с теми же обозначениями полуосей.

4.4. Глубина поверхностной трещины  $l$  (или подповерхностной  $2l$ ), при которой выполняется условие (21), считается критической глубиной, т.е. в этом случае  $l = l_{кр}$ .

4.5. Расчет КИН в вершинах полуосей полуэллиптических поверхностных и эллиптических подповерхностных трещин при изменяющихся вдоль направления роста трещин напряжениях выполняется по нормативным документам.

4.6. Для расчетных оценок КИН в сечениях и зонах ротора или корпуса, определяющих их живучесть с дефектами, должны быть определены поля напряжений вдоль направления роста дефекта при основных переменных и установившихся режимах. После этого для стационарных режимов выполняются расчеты КИН —  $K_I$ , а для нестационарных режимов (пуски — остановки и т.п.) их размах  $\Delta K_I = K_{I\max} - K_{I\min}$  (в циклах, соответствующих переменным режимам) при всех характерных рассматриваемых режимах для ряда последовательно увеличивающихся значений глубины трещины.

4.7. По найденным для каждого значения глубины трещины  $l$  максимальным значениям КИН —  $K_{Ij\max}$  при каждом  $j$ -м типе стационарного режима и максимальным значениям размахов КИН  $\Delta K_{Ij\max}$  при каждом  $j$ -м типе переменного режима с помощью кинетических диаграмм или аппроксимирующих их уравнений типа Пэриса для данного материала детали (ротора или корпуса) определяют значения мгновенных скоростей роста трещины  $V_{nj}(l)$  под действием ползучести из уравнений

$$V_{nj} = \frac{dl}{dt_j} = C_n \cdot K_{Ij}^{m_n}(l) \quad (22)$$

и  $V_{цj}(l)$  под действием циклических нагрузок

$$V_{цj}(l) = \frac{dl}{dN_j} = C_{ц} \cdot \left( \frac{\Delta K_{Ij}(l)}{\sqrt{1-R}} \right)^{m_{ц}}, \quad (23)$$

где  $t_j$  — время действия установившейся ползучести при стационарном режиме  $j$ -го типа;

$N_j$  — число циклов нагружений  $j$ -го типа;

$C_n, m_n, C_{ц}, m_{ц}$  — физические константы материала, определяемые экспериментально;

$R$  — коэффициент асимметрии цикла, определяемый выражением:

$$R = \begin{cases} \frac{K_{1\min}}{K_{1\max}} & \text{при } -1 \leq \frac{K_{1\min}}{K_{1\max}} \\ -1 & \text{при } \left| \frac{K_{1\min}}{K_{1\max}} \right| > 1 \end{cases} \quad (24)$$

Допускается использование других зависимостей  $V_{\text{ц}}$  от  $R$  в формуле (23), в частности, в запас живучести допускается полагать  $R = 0$  в тех случаях, когда согласно расчету  $R < 0$  или  $R > 1$ .

**4.8.** Нарботка  $G^*(l)$  (в годах), в течение которой трещина прорастает от начальной глубины  $l_0$  до текущей  $l$  при комбинированном воздействии циклических нагрузок  $k$  типов и ползучести на стационарных режимах  $q$  типов определяется интегрированием соотношения:

$$G^*(l) = \int_{l_0}^l \frac{dl}{\sum_{j=1}^k [V_{\text{ц}j}(l) \cdot n_j^r] + \sum_{j=1}^q [V_{\text{п}j}(l) \cdot t_j^r]} \quad (25)$$

где  $V_{\text{п}j}(l)$  — скорость роста трещины под действием ползучести при стационарном режиме  $j$ -го типа, определяемая из формулы (22), мм/ч;

$V_{\text{ц}j}(l)$  — скорость роста трещины под воздействием циклической нагрузки при переменном режиме  $j$ -го типа, определяемая из формулы (23), мм/цикл;

$n_j^r$  — годовое число циклов  $j$ -го типа, цикл;

$t_j^r$  — годовое время воздействия ползучести при  $j$ -м стационарном режиме, ч.

**4.9.** Расчетное время роста трещины до критического размера  $l = l_{\text{кр}}$ , определяющее предельное расчетное время живучести ротора или корпуса с трещиной, определяется из формулы (25), если в качестве верхнего предела интегрирования принять глубину трещины  $l = l_{\text{кр}}$ , при которой коэффициент интенсивности напряжений достигает своего критического значения — вязкости разрушения  $K_1 = K_{1c}$  (если  $l_{\text{кр}}/H \leq 0,7$  для поверхностной трещины).

**4.10.** Расчетное время докритического роста трещины  $[G^*]$  от начальной глубины  $l_0$  до глубины  $l_{пр}$ , соответствующей предельно допускаемому состоянию ротора или корпуса с дефектом с учетом критериев и запасов живучести, определяется, как минимум из следующих величин:

$$[G^*] = \min \{G^I, G^{II}, G^{III}, G^{IV}\}, \quad (26)$$

где  $G^I$  — время подрастания трещины до того момента, когда годовая скорость достигнет принятой в качестве предельного значения  $V^*$ , мм/год;

$G^{II}$  — ориентировочное время, при котором резко возрастает скорость роста трещины, что может служить сигналом о наступлении предкритического состояния;

$G^{III}$  — время, по истечении которого значение КИН при наиболее неблагоприятном режиме (режим с наибольшей вероятностью хрупкого разрушения) достигает величины

$$K_I(l_{пр}^{III}) = K_{Ic}/n_k,$$

где  $n_k$  — коэффициент запаса по КИН;

$G^{IV}$  — время, по истечении которого глубина трещины достигает предельно допускаемой величины  $l = l_{пр}^{IV} = l_{кр}/n_l$ , где  $n_l$  — коэффициент запаса по критической глубине или по критическому размеру дефекта (трещины).

**4.11.** Для роторов и корпусных деталей турбин принимаются следующие значения предельного значения годовой скорости роста трещины  $V^*$  (мм/год), запасов по КИН —  $n_k$  и по глубине дефекта (трещины) —  $n_l$ :

$$V^* \leq 1,0 \text{ мм/год};$$

$$n_k \geq 1,5;$$

$$n_l \geq 2,2.$$

**Примечания:** 1 Для трещин в ободе диска рекомендуется принимать  $V^* \leq 2,5$  мм/год;

2 После накопления опыта сопоставления расчетных и экспериментальных оценок скорости и времени докритического роста трещин в роторах и корпусных деталях турбин, определяющих время их живучести с трещинами, приведенные в п. 4.10, критерии живучести (26) и указанные в п. 4.11 значения запасов должны подвергнуться дополнительному анализу и корректировке.



## 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО И ПОЛНОГО РАСЧЕТНОГО РЕСУРСОВ РОТОРОВ

5.1. В соответствии с определением предельного состояния для роторов, приведенным в п. 4.2.1 раздела 4 настоящей Инструкции, расчетный ресурс ротора  $[G]$  определяется формулой (18) (приложение С), как наработка до появления трещин ползучести и (или) малоциклового усталости при обеспечении принятых запасов по напряжениям, деформациям, циклам и накапливаемой поврежденности в соответствии с заданными при проектировании или известными из опыта режимами эксплуатации за весь срок службы.

Расчетное время живучести роторов с дефектами не включается в их расчетный ресурс.

5.2. Остаточный ресурс ротора с учетом запасов  $[G]_{\text{ост}}$  определяется по формулам (13) – (15) на основе расчетных оценок поврежденности, накопленной к моменту анализа возможности продления ресурса с учетом особенностей режимов эксплуатации за предшествующий анализу период, и поврежденности, которая будет накапливаться в последующий за анализом период с учетом особенностей прогнозируемых на этот период режимов эксплуатации.

5.3. При расчетной оценке остаточного ресурса ротора проверяется удовлетворение критериев статической (кратковременной и длительной) и циклической прочности и предельно допускаемой поврежденности для следующих зон:

- осевой канал на участках дисков двух первых ступеней РВД и РСД;
- передняя и задняя галтели дисков двух первых ступеней РВД и РСД;
- тепловые канавки переднего концевое уплотнения (ПКУ), промежуточного уплотнения и диафрагменного уплотнения между дисками 1-й и 2-й ступеней (если такие канавки имеются);
- концентраторы в пазах Т-образного и галтелях зубчиков грибовидных хвостовых соединений ободьев дисков первых ступеней РВД и РСД.

5.4. В том случае, если накопленное число пусков турбины с исследуемым ротором не превысило 300, допускается

выполнять расчетную оценку остаточного ресурса  $[G]_{\text{ост}}$  только по критериям длительной статической прочности и накапливаемой поврежденности от действия только ползучести для зоны осевого канала (если в последующий за анализом период не прогнозируется значительное увеличение среднегодовых чисел пусков по сравнению с требованиями нормативных документов к маневренности турбоагрегатов рассматриваемого типа).

В этом случае в формулах (13) – (15) для расчета остаточного ресурса можно полагать  $n'_i = 0$  и  $(n_i^r)'' \approx 0$ , а суммарная накапливаемая за предшествующий анализу и последующий периоды поврежденность с учетом запасов  $[L]$  в формуле (11) должна удовлетворять условию  $[L] \leq 0,9$  вместо 1,0, а в формуле (15) –  $0,9/n$  вместо  $1/n$ .

**5.5.** Оценка кратковременной статической прочности роторов выполняется по номинальным напряжениям от центробежных сил (ЦБС) без учета температурных напряжений и их концентрации.

**5.6.** Оценка длительной статической прочности выполняется по номинальным напряжениям и местным напряжениям с учетом концентрации в условиях ползучести от действия ЦБС при номинальной (расчетной) частоте вращения и температурном поле ротора, соответствующем номинальному режиму.

**5.7.** Запасы кратковременной статической прочности роторов

5.7.1. Для роторов, работающих при упругом деформировании, запас прочности при номинальной (расчетной) частоте вращения определяется по отношению к максимальному значению номинального эквивалентного напряжения  $\sigma_3$ .

5.7.2. Коэффициент запаса по пределу текучести материала цельнокованных роторов  $\sigma_{0,2}^{\theta}$  при расчетной температуре  $\theta$  на стационарном режиме принимается равным  $n_T \geq 1,6$ .

**5.8.** Запасы прочности при статическом нагружении в условиях ползучести

5.8.1. Определение запасов прочности в условиях ползучести производится только для номинальной (расчетной) частоты вращения ротора.

5.8.2. Для роторов, работающих в условиях ползучести, запас по номинальным напряжениям, полученным из расче-