

Разработка комплектов образцов и моделей для определения параметров выявляемости вихретоковым контролем дефектов при выполнении работ по установлению и увеличению ресурса основных деталей ГТД

Цыкунов Н.В., Якубин С.П.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва
e-mail: nvtsykunov@ciam.ru

При выполнении работ по установлению и увеличению ресурса основных деталей ГТД требуется иметь данные о параметрах проводимого неразрушающего контроля, его возможностях обнаруживать дефекты. Размеры обнаруживаемых неразрушающим контролем дефектов в зонах деталей, для которых проводится расчет ресурса и определение периодичности осмотров (инспекций), определяют по результатам испытаний и исследований образцов, моделей и деталей с дефектами. В статье рассмотрены конструктивные и технологические особенности изготовления комплектов образцов и моделей для определения параметров выявляемости дефектов (трещин) в основных деталях ГТД вихретоковым методом контроля.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, выявляемость дефектов, образцы, модели, основные детали ГТД

Development of samples and models for determining of defect detectability by eddy current testing when determining and increasing life of critical parts of a GTE

Tsykunov N.V., Yakubin S.P.

CIAM, Moscow

When working on determining and increasing life of critical parts of a GTE, it is required to have data on parameters of performed non-destructive testing and its ability to detect defects. Sizes of defects detected by non-destructive testing in areas of parts for which life is calculated and frequency of inspections are determined based on results of tests and studies of samples, models and parts with defects. The article discusses design and technological features of manufacturing sets of samples and models for determining parameters of defect (crack) detection in critical parts of a GTE by eddy current testing.

Keywords: eddy current testing, detection of defects, samples, models, critical parts of a GTE

Введение

Вихретоковый метод неразрушающего контроля применяют для обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов в основных деталях (ОД) авиационных ГТД, изготавливаемых из никелевых и титановых сплавов. Для деталей из магнитных сталей вихретоковый контроль обычно не назначают из-за возможных магнитных аномалий в материале и появления из-за этого сигналов, не связанных с наличием трещин (дефек-

тов). Вихретоковый контроль используют для выявления дефектов в ОД в процессе производства, при эксплуатации и ремонте ГТД. Возможности данного метода существенно зависят от конкретной зоны ОД и типа обнаруживаемого дефекта. Метод позволяет обнаружить не только несплошности (трещины), но и такие дефекты, как отклонения формы отверстий, повышенная шероховатость и наличие глубоких рисок на поверхности, завальцованные внутрь детали сколы от резца или сверла, прижоги поверхности и другие отклонения от номиналь-

ных свойств. Отклонения, выявляемые вихретоковым контролем, разделяют на дефекты, связанные с изменением геометрии детали (геометрические аномалии), и дефекты, обнаруживаемые по изменению электропроводности и/или магнитной проницаемости материала в поверхностном слое (негеометрические аномалии) [1].

Система вихретокового контроля [2] может быть настроена на обнаружение одного типа дефектов, при этом влияние других аномалий будет подавляться. Например, при контроле отверстий с целью обнаружения трещин связанные с биением или с некруглостью отверстий сигналы убирают, настраивая фильтр верхних частот [3] выше частоты сигнала от вращения преобразователя.

Отстройка от мешающих контролю факторов приводит к уменьшению чувствительности контроля. Например, чтобы повышенная шероховатость не мешала контролировать деталь, контроль «загрубляют», уменьшая коэффициент усиления вихретокового сигнала или повышая уровень срабатывания сигнализации о дефекте. В случае с использованием фильтра верхних частот для исключения из вихретокового сигнала информации о биении преобразователя относительно поверхности отверстия не будет учитываться возможное максимальное изменение зазора между преобразователем и деталью, что фактически будет приводить к снижению чувствительности контроля в зоне максимального зазора. То есть для достижения максимальной чувствительности при вихретоковом контроле деталь должна быть обработана с высоким качеством, что в конечном счете будет положительно сказываться на эксплуатационных свойствах и ресурсных показателях детали. Когда высокая шероховатость поверхности детали или другие отклонения не позволяют провести вихретоковый контроль, деталь обычно возвращают на доработку поверхности до состояния, позволяющего выполнить вихретоковый контроль с высокой чувствительностью.

К недостаткам вихретокового метода можно отнести ограничения по контролю краевых зон, зон стыковки и сопряжения поверхностей в направлении сканирования. Для этих зон обычно используют капиллярный и другие методы неразрушающего контроля.

Существенное преимущество перед капиллярным и другими методами вихретоковый метод имеет в случае дефектоскопического контроля глубоких отверстий [4]. Несомненно, вихретоковый контроль глубоких отверстий вращающимся преобразователем [3] значительно технологичнее капиллярного и обладает большей чувствительностью.

Для выполнения работ по установлению и увеличению ресурса основных деталей ГТД требуется иметь данные о параметрах проводимого контроля, его возможностях обнаруживать дефекты. При расчете ресурса и

определении периодичности осмотров (инспекций) ОД используются размеры обнаруживаемых неразрушающим контролем дефектов в зонах деталей, для которых проводится расчет [5]. Размеры обнаруживаемых неразрушающим контролем дефектов могут быть определены в результате испытаний и исследований, проводимых в соответствии с методическими рекомендациями [6] и требованиями ГОСТ Р 58989-2020 [5].

Контролируемые зоны основных деталей и образцы для настройки вихретоковых систем

Геометрические особенности зон ОД, подлежащих вихретоковому контролю, можно разделить на несколько групп: отверстия, радиусные переходы, пазы (рис. 1 и рис. 2). Геометрические зоны могут многократно повторяться в контролируемой детали. К таким зонам относятся пазы под лопатки, отверстия различного назначения, шлицы. Галтели перехода полотна к ступице или полотна к ободу в дисках или радиусные переходы от одного диаметра к другому в валах, как правило, бывают единичными или повторяющимися с различной величиной радиуса.

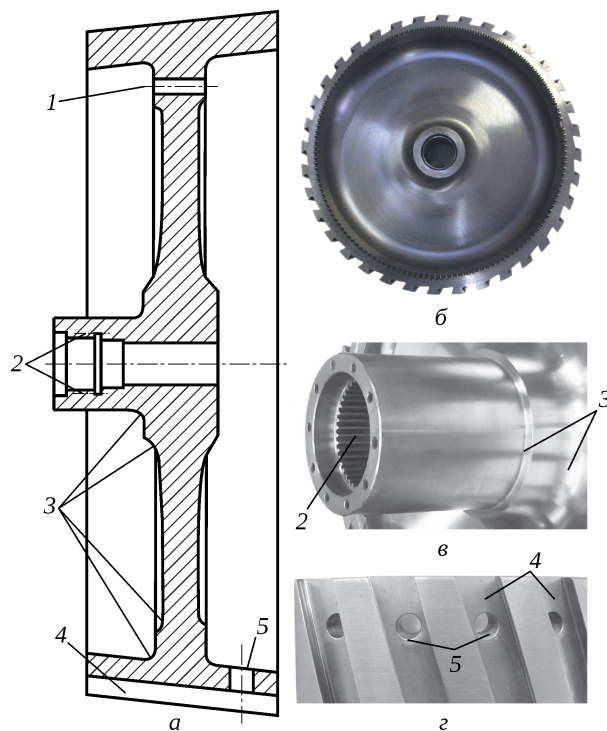


Рис. 1. Диск компрессора. Основные геометрические зоны, контролируемые вихретоковым методом:

- a* – схема расположения контролируемых зон в сечении диска;
- б* – диск;
- в* – вид на шлицы в центральном отверстии диска;
- г* – пазы и отверстия под штифты;
- 1 – отверстия под стяжные болты (шпильки);
- 2 – шлицы;
- 3 – радиусные переходы (галтели);
- 4 – пазы под лопатки;
- 5 – отверстия под штифты

Если радиус кривизны ОД в зоне контроля около 20 мм и более, то образцы для настройки вихретокового контроля обычно делают с плоской поверхностью и надрезами, моделирующими дефекты. Для обеспечения

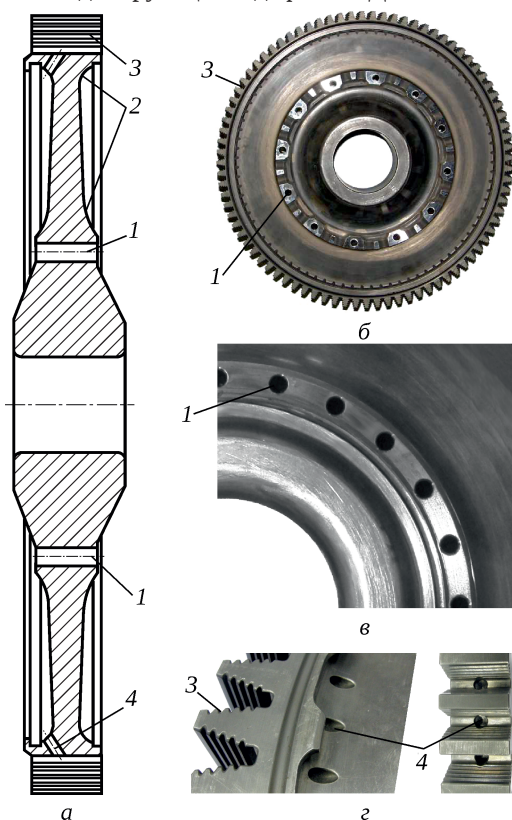


Рис. 2. Диск турбины. Основные геометрические зоны, контролируемые вихретоковым методом: а – схема расположения контролируемых зон в сечении диска; б – диск; в – зона центрального отверстия диска с отверстиями под стяжные болты; г – пазы под лопатки с отверстиями для охлаждающего воздуха; 1 – отверстия под стяжные болты; 2 – радиусные переходы (галтели); 3 – пазы под лопатки; 4 – отверстия для охлаждающего воздуха

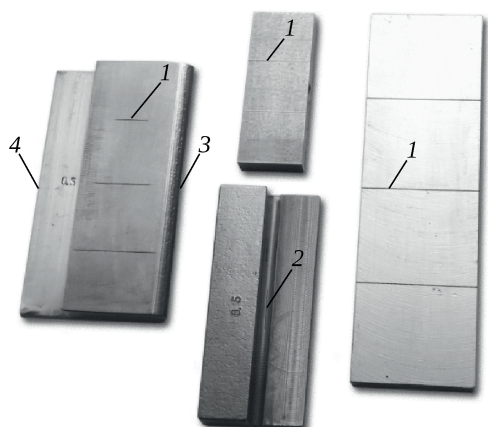


Рис. 3. Образцы, используемые для настройки и проверки вихретоковых дефектоскопов, с модельными дефектами (надрезами): 1 – на плоской поверхности; 2 – на поверхности паза; 3 – на выпуклой поверхности; 4 – на кромке

контроля пазов, галтелей, отверстий и других зон ОД изготавливают настроечные (контрольные) образцы с такими же геометрическими особенностями, в которых размещают модели дефектов – надрезы (рис. 3 и рис. 4). Кроме контрольных и настроечных образцов, в соответствии со стандартом ГОСТ Р 56510-2015 [7], для подготовки и настройки приборов и систем вихретокового контроля могут также использоваться образцы, имеющие названия «эталон», «эталонный образец», «мера», «эталонная мера», «комплект эталонных мер», «мера моделей дефекта», «комплект мер моделей дефектов». Проверку и калибровку оборудования обычно проводят с использованием комплектов эталонных мер или комплектов мер моделей дефектов. Использовать в названиях слово «стандартный образец» или «стандартный образец предприятия» не рекомендуется [8].

В ГОСТ Р ИСО 15549-2009 [2] дано следующее описание эталонных образцов: «Эталонные образцы, содержащие известные особенности, используют для настройки системы контроля с целью проведения функциональных проверок, проверки возможностей системы и получения калибровочных кривых». Особенности эталонных образцов определены как отверстия или выемки определенных размеров, естественные или «вынужденные» дефекты с известными характеристиками (например, усталостные трещины), известная толщина покрытий, известный диапазон свойств материала. Отмечается, что «как правило, эталонные образцы состоят из того же материала и имеют обработку, аналогичную контролируемому изделию», а «эквивалентность какого-либо альтернативного технологического процесса должна быть подтверждена». Эталонные образцы и измеряемые параметры особенностей не должны со временем значительно изменяться [2].

Как отмечается в [8], термин «настроечный образец» является частным случаем термина «контрольный образец». Контрольные образцы применяются не только

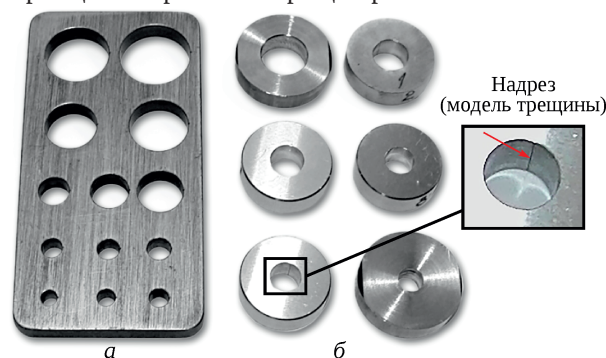


Рис. 4. Образцы, используемые для настройки и проверки вихретоковых дефектоскопов, с модельными дефектами (надрезами) в отверстиях: а – универсальный образец с отверстиями диаметром 4,5...20 мм; б – образцы с отверстиями диаметром 6,4...13,5 мм

для настройки систем вихретокового контроля, но также для оценки их параметров. Определение контрольного образца дано в ГОСТ Р 53697-2009 (ISO/TS 18173:2005) [9]. Согласно [9], контрольный образец – это образец из материала определенного состава с заданными геометрической формой и размерами, используемый для настройки и оценки параметров аппаратуры и дефектоскопических материалов, а также в качестве индикатора их работоспособности. Контрольный образец может содержать более одного искусственного или естественного дефекта. На рис. 3 и рис. 4 показаны контрольные (настроечные) образцы, в которых дефекты выполнены в виде тонких надрезов, моделирующих трещины различной длины и глубины.

Надрезы в образцах изготавливают фрезерованием или прорезанием (прожиганием) проволокой или электродом на электроэрозионных станках. Надрезы в отверстиях, на плоских поверхностях и кромках современное оборудование позволяет делать шириной 0,1...0,2 мм при оптимальных затратах. Глубина надрезов, в зависимости от решаемой задачи, может составлять от 0,1 мм до нескольких миллиметров.

Образцы с надрезами могут быть изготовлены с высокой точностью и небольшими затратами. Доступность изготовления и возможность повторения дефектов с высокой точностью позволяет использовать такие образцы для настройки приборов и проводить сравнительный анализ чувствительности вихретокового контроля, выполняемого на оборудовании различных изготовителей и на различных предприятиях.

Разработка контрольных образцов и моделей для определения параметров выявляемости вихретоковым контролем трещин в основных деталях ГТД

Рассмотренные выше контрольные образцы (см. рис. 3 и рис. 4) выполняют важную функцию в технологическом процессе вихретокового контроля, однако их использование не дает возможности оценить размеры (длину, глубину) усталостных трещин, выявляемых применяемой технологией в конкретных деталях двигателя. Требования, которым должны удовлетворять образцы и модели для определения размеров выявляемых эксплуатационных трещин в деталях, приведены в работах [5; 6]. Образцы для тестов по определению параметров выявляемости вихретоковым контролем трещин в ОД должны позволять моделировать процесс контроля в части материала, технологии изготовления, геометрии зоны контроля, состояния поверхности и возможных параметров дефектов.

Геометрия образца должна быть пригодна для выполнения оцениваемого контроля, отражать те же слож-

ности, с которыми приходится сталкиваться при контроле реальных деталей. Образцы могут иметь форму реальных деталей со специфической обработкой и геометрией, например иметь отверстия под болты, плоские поверхности, скругления, радиусы, т.е. те элементы, которые влияют на результаты проверки. Положение дефекта в образце должно отражать дефекты в реальных деталях (например, на плоской поверхности или на поверхности отверстия).

Материал образцов должен иметь физические свойства проверяемой детали. Получение заготовки (ковка, литье или штамповка) и термообработка являются критическими воздействиями, поэтому образец должен имитировать те же металлургические свойства, что и проверяемая деталь. Например, обработка может завальцевать дефекты и таким образом повлиять на результаты вихретокового контроля. Конечная обработка образца по шероховатости поверхности должна быть такой же, как у детали.

Для оценки выявляемости трещин вихретоковым контролем рекомендуется иметь 40...60 мест с дефектами и по крайней мере три бездефектных места с такими же параметрами. Бездефектный участок не обязательно должен быть отдельным образцом. Если на образце есть несколько мест, которые могут содержать дефекты, то каждое место может считаться участком проверки. Размеры дефектов должны быть равномерно распределены в диапазоне от больших трещин, которые всегда могут быть обнаружены, до маленьких трещин, которые всегда будут пропущены.

Вихретоковый метод редко применяют для контроля протяженных плоских поверхностей, так как в таком случае большую производительность имеет капиллярный метод. Конкуренцию ему вихретоковый метод составит только в случае, если сканирование больших поверхностей проводится с использованием роботизированных установок вихретокового контроля. Для оценки выявляемости трещин вихретоковым методом на плоских поверхностях можно использовать образцы, разработанные для капиллярного контроля (рис. 5) [10].

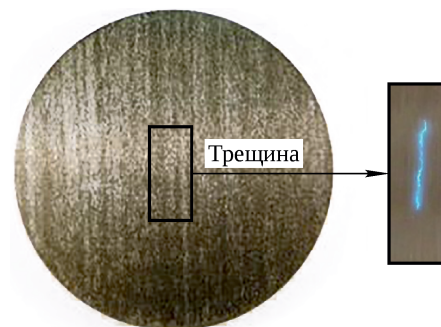


Рис. 5. Образец с усталостной трещиной на плоской поверхности для тестирования капиллярного и вихретокового контроля [10]

Образцы представляют собой мини-диски диаметром 57 мм и толщиной 2...5 мм, с выращенными на поверхности трещинами малоциклового усталости. Трещины на плоских поверхностях в образцах для тестирования вихретокового контроля чаще всего получают по общепринятой технологии, которая приведена в руководстве [6]: изготавливают заготовку контрольного образца с припуском, наносят концентратор напряжений для инициирования трещины, прикладывают к образцу циклическую нагрузку и выращивают в образце трещину. Затем припуск с концентратором напряжений удаляют.

Вихретоковый контроль глубоких отверстий проводится вращающимися преобразователями. Большое количество глубоких отверстий, подлежащих контролю, расположены в дисках компрессора и турбины авиационных ГТД. Как правило, это отверстия под стяжные болты и отверстия для подачи охлаждающего воздуха в лопатки турбины. Для отверстий диаметром 6...7 мм и более могут изготавливаться трубчатые образцы (рис. 6) [11]. Контрольные образцы, на которых рекомендуется выращивать трещины в отверстиях диаметром менее 6...7 мм, представлены на рис. 7. Для того чтобы отверстие диаметром 7 мм было глубоким, толщина таких образцов в зоне отверстия должна быть не менее 15 мм.

Для получения усталостных трещин в радиусных переходах (галтелях) и шлицах используют образцы, показанные на рис. 8.

При подготовке набора трещин в геометрически сложных зонах, таких как лопаточные пазы, или в зонах специальных технологических процессов, таких как сварные швы дисков и барабанов, часто целесообразно выращивать трещины на натурной детали. Для этих работ, как правило, используют детали, забракованные по параметрам, не связанным с зоной контроля, или детали, выведенные из эксплуатации, с неповрежденной зоной контроля.

Деталь после эксплуатации, в которой были обнаружены трещины в пазах, отверстиях или других повторяющихся зонах контроля, может без дополнительной доработки использоваться в качестве модели, если трещины были обнаружены только в некоторых зонах и их число составляет 10...30% общего количества. Планируя применение модели, взятой из эксплуатации, необходимо планировать и металлографические исследования зон контроля, так как в такой модели редко удастся провести измерения выявленных и невыявленных трещин без разрушения самой модели.

Для выращивания усталостных трещин в натурных деталях и контрольных образцах обычно используют схемы нагружения, представленные на рис. 9 (P – циклическая нагрузка). Чтобы их реализовать, разрабатывается и изготавливается специальная оснастка, позво-

ляющая закреплять деталь или образец на испытательной машине и циклически нагружать ее в зоне получения трещины (рис. 10).

При проектировании образцов, моделей и оснастки следует руководствоваться следующими исходными данными.

1. Толщину материала в зоне выращивания трещин (H) в образцах и моделях из титановых и никелевых сплавов рекомендуется выбирать равной 4 ± 1 мм, если в этих местах в натурных деталях толщина равна 4 мм или значительно больше. Такой выбор обосновывается тем, что вихревые токи на глубине 4 мм в титановых и никелевых сплавах почти равны нулю, а трещины

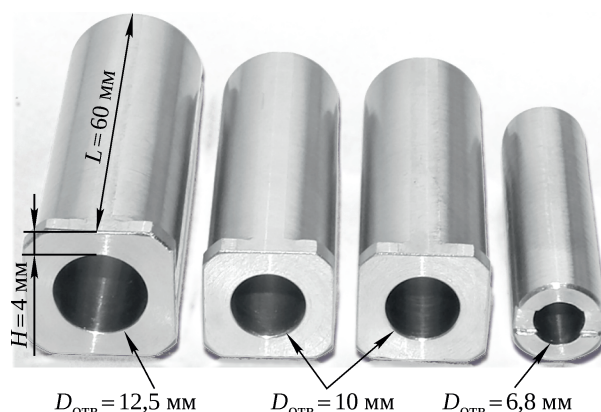


Рис. 6. Образцы для выращивания трещин в отверстиях диаметром более 6...7 мм

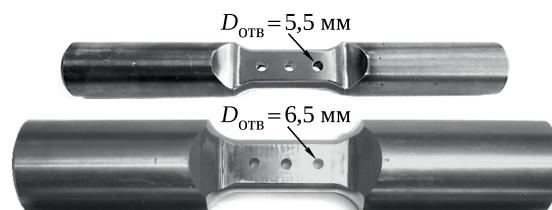


Рис. 7. Образцы для выращивания трещин в отверстиях диаметром менее 6...7 мм

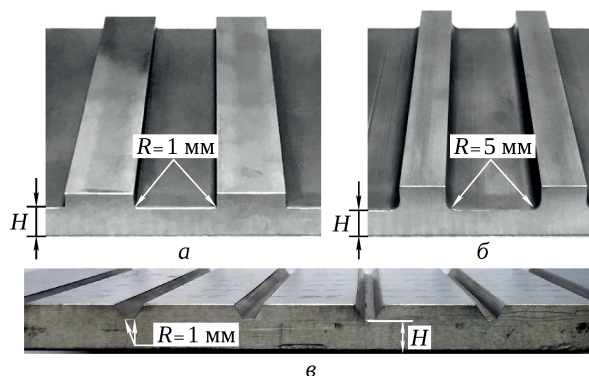


Рис. 8. Образцы для выращивания трещин в шлицевых пазах и радиусных переходах (галтелях):
 а – образец с радиусными переходами $R = 1$ мм;
 б – образец с радиусными переходами $R = 5$ мм;
 в – образец со шлицевыми пазами и радиусом на дне $R = 1$ мм

глубиной 2 мм (половина толщины) воспринимаются современными приборами как бесконечные. В случае меньшей толщины детали в зоне роста трещин – моделируется толщина детали.

2. Длина образца с глубоким отверстием (L) принимается равной глубине моделируемого отверстия.

3. Диаметр образца (D) и расстояние между опорами (B) выбираются из условия достаточности нагрузки 4 ± 2 т для инициирования и выращивания усталостной трещины.

4. Диаметр точечного толкателя в зоне контакта с образцом выбирается равным 4 ± 1 мм.

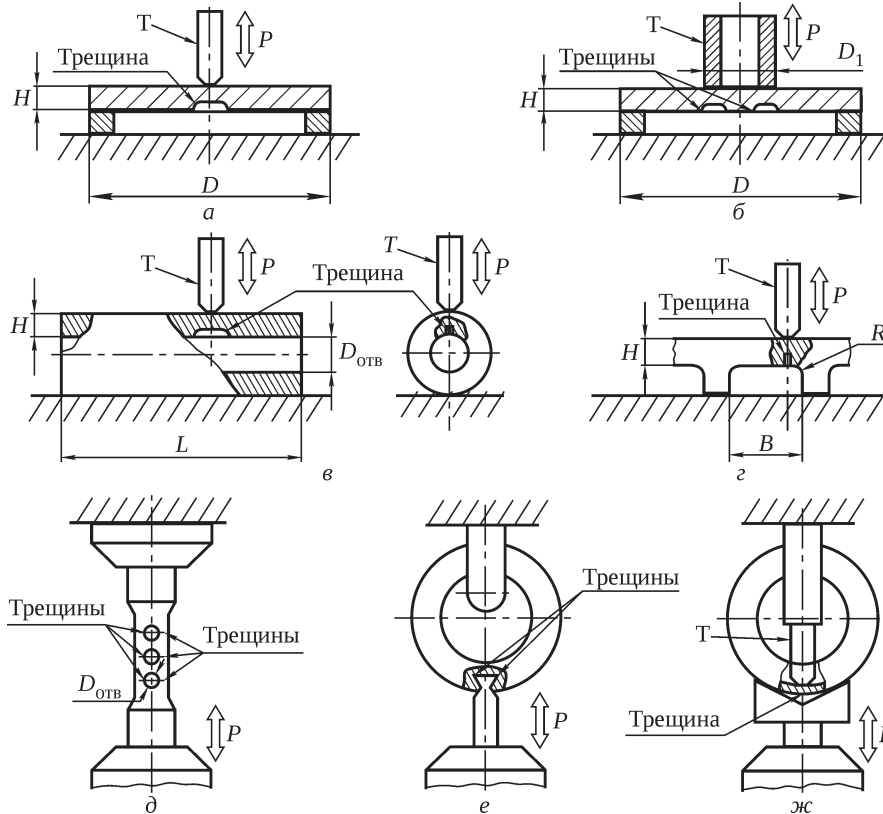


Рис. 9. Схемы нагружения контрольных образцов и моделей при выращивании усталостных трещин:
 а – нагружение точечным толкателем (Т) плоского образца диаметром D ; б – нагружение трубчатым толкателем диаметром D_1 плоского образца диаметром D ; в – нагружение точечным толкателем образца с глубоким отверстием диаметром $D_{отв}$; г – нагружение точечным толкателем образца с переходом (галтелью) радиусом R ; д – нагружение образца с отверстиями диаметром $D_{отв}$; е – нагружение модели при выращивании трещин в лопаточных пазах; ж – нагружение модели при выращивании трещин в пазах, канавках, сварных швах

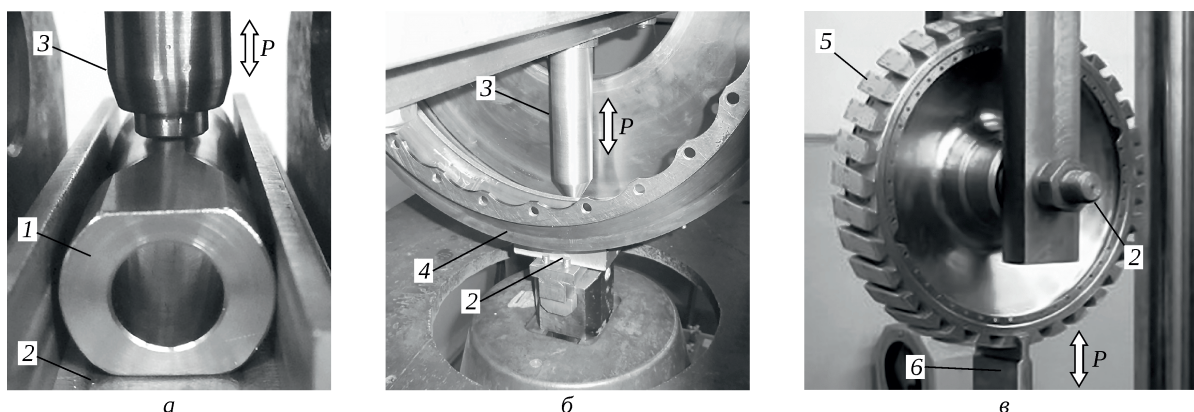


Рис. 10. Нагружение контрольных образцов и моделей при выращивании усталостных трещин:
 а – испытания образца с глубоким отверстием;
 б – испытания модели при выращивании трещин в сварном шве;
 в – испытания модели при выращивании трещин в пазах под лопатки [12];
 1 – образец; 2 – опора; 3 – толкатель; 4 – барабан; 5 – диск; 6 – имитатор лопатки

Проектируя оснастку, следует предусматривать возможность доступа в зону роста трещины для ее обнаружения визуальным-оптическим или другим методом неразрушающего контроля.

Спроектированная и изготовленная оснастка должна обеспечивать получение усталостных трещин глубиной от 0,05 мм и менее до 2 мм и более при числе циклов нагружения от $(5 \dots 10) \cdot 10^3$ до $(50 \dots 100) \cdot 10^3$. Для реализации этих требований расчетом или экспериментально определяется циклическая нагрузка (P). Постоянный контроль в зоне роста трещины и нахождение признаков, свидетельствующих о ее появлении, как правило, обеспечивают получение требуемого [5; 6] набора размеров дефектов. Наборы образцов и (или) моделей изготавливаются для каждой характерной зоны основной детали, в которой требуется оценить выявляемость дефектов (трещин) при выполнении работ по установлению и увеличению ресурса основных деталей.

Заключение

Выполнен анализ применения вихретокового метода для контроля основных деталей авиационных газотурбинных двигателей. Отмечено, что вихретоковый метод наиболее эффективен при контроле глубоких отверстий. Вихретоковым контролем выявляются геометрические

и негеометрические аномалии отверстий. Показана роль настроечных, контрольных и эталонных образцов, а также мер, моделей и комплектов моделей дефектов в метрологическом обеспечении вихретокового контроля.

Рассмотрены конструктивные и технологические особенности разрабатываемых комплектов образцов и моделей для определения параметров выявляемости вихретоковым контролем дефектов при выполнении работ по установлению и увеличению ресурса основных деталей авиационных ГТД.

Разработаны схемы нагружения образцов и моделей при выращивании усталостных трещин на плоской поверхности, на поверхности глубокого отверстия, в радиусном (галтельном) переходе, шлицевых пазах, лопаточных пазах, канавках и сварном шве.

Установлены типовые геометрические особенности зон основных деталей, в которых проводится вихретоковый контроль. Приведены примеры образцов и моделей с типовыми зонами вихретокового контроля.

Определены требования к изготовлению образцов, моделей и оснастки для выращивания трещин усталости в моделируемых зонах основных деталей авиационных ГТД. Даны рекомендации по размерам образцов и оснастки, а также по режимам нагружения для выращивания трещин разного размера.

Литература

1. Development of anomaly distributions for machined holes in aircraft engine rotors / R. Corran, M. Gorelik, D. Lehmann, S. Mosset // ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air : May 8–11, 2006, Barcelona, Spain. Vol. 5: Marine; Microturbines and small turbomachinery; Oil and gas applications; Structures and dynamics, pt. A/B. P. 941–950. GT2006-90843.
2. ГОСТ Р ИСО 15549-2009. Контроль неразрушающий. Контроль вихретоковый. Основные положения. М. : Стандартинформ, 2011. IV, 8 с.
3. ГОСТ Р ИСО 12718-2009. Контроль неразрушающий. Контроль вихретоковый. Термины и определения. М. : Стандартинформ, 2011. IV, 36 с.
4. Damage tolerance of hole features in high-energy turbine engine rotors : advisory circular : date: 8/28/09 : initiated by: ANE-111 : AC No: 33.70-2 / U.S. Department of transportation, Federal Aviation Administration. 2009. vii, 40 p.
5. ГОСТ Р 58989-2020. Двигатели газотурбинные авиационные. Неразрушающий контроль основных деталей. Общие требования. М. : Стандартинформ, 2020. III, 8 с.
6. Nondestructive evaluation system reliability assessment : handbook : MIL-HDBK-1823A : 7 April 2009 / Department of Defense. USA, 2009. 171 p. Not measurement sensitive.
7. ГОСТ Р 56510-2015. Метрологическое обеспечение в области неразрушающего контроля. М. : Стандартинформ, 2019. II, 6 с.
8. Муравская Н.П., Лазаренко Е.Р. О метрологическом обеспечении в области неразрушающего контроля // Метрология. Метрологическое обеспечение производства : сайт. URL: <https://metrob.ru/html/Stati/metrolob/Muravskaya.html>.
9. ГОСТ Р 53697-2009 (ISO/TS 18173:2005). Контроль неразрушающий. Основные термины и определения. М. : Стандартинформ, 2019. IV, 8 с.
10. Цыкунов Н.В. Оценка выявляемости дефектов в основных деталях двигателей методами неразрушающего контроля // Новые технологические процессы и надежность ГТД. Вып. 10. Некоторые вопросы обеспечения прочностной надежности перспективных ГТД : научно-технический сборник статей / под ред. Ю.А. Ножницкого. М. : ЦИАМ, 2015. С. 53–59.

-
11. Цыкунов Н.В. Особенности обнаружения трещин в отверстиях дисков // Прочность и надежность газотурбинных двигателей : сборник научных трудов / под ред. Ю.А. Ножницкого. М. : ЦИАМ, 2020. С. 66–70.
 12. Цыкунов Н.В., Якубин С.П., Малиновский Е.К. Разработка экспериментальных моделей дисков с трещинами и проведение исследований выявляемости дефектов методами неразрушающего контроля в зонах конструктивных особенностей дисков и в неразъемных соединениях роторов ГТД // Основные результаты научно-технической деятельности ЦИАМ (2017 г.) / под общ. ред. М.В. Гордина, А.И. Ланшина, М.Я. Иванова. М. : ЦИАМ, 2018. С. 599–602.

References

1. Development of anomaly distributions for machined holes in aircraft engine rotors / R. Corran, M. Gorelik, D. Lehmann, S. Mosset // ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air : May 8–11, 2006, Barcelona, Spain. Vol. 5: Marine; Microturbines and small turbomachinery; Oil and gas applications; Structures and dynamics, pt. A/B. P. 941–950. GT2006-90843.
2. GOST R ISO 15549-2009. Kontrol' nerazrushaiushchii. Kontrol' vikhretokovyi. Osnovnye polozheniia [State Standard 15549-2009. Non-destructive testing. Eddy current testing. General principles]. Moscow: Standartinform, 2011. IV. 8 p.
3. GOST R ISO 12718-2009. Kontrol' nerazrushaiushchii. Kontrol' vikhretokovyi. Terminy i opredeleniia [State Standard 12718-2009. Non-destructive testing. Eddy current testing. Terminology and definitions]. Moscow: Standartinform, 2011. IV. 36 p.
4. Damage tolerance of hole features in high-energy turbine engine rotors : advisory circular : date: 8/28/09 : initiated by: ANE-111 : AC No: 33.70-2 / U.S. Department of transportation, Federal Aviation Administration. 2009. vii, 40 p.
5. GOST R 58989-2020. Dvigateli gazoturbinnnye aviatsionnye. Nerazrushaiushchii kontrol' osnovnykh detalei [State Standard 58989-2020. Aviation gas turbine engines. Non-destructive testing of critical parts. General requirements]. Moscow: Standartinform, 2020. III. 8 p.
6. Nondestructive evaluation system reliability assessment : handbook : MIL-HDBK-1823A : 7 April 2009 / Department of Defense. USA, 2009. 171 p. Not measurement sensitive.
7. GOST R 56510-2015. Metrologicheskoe obespechenie v oblasti nerazrushaiushchego kontroliia [State Standard 56510-2015. Metrological support of non-destructive testing]. Moscow: Standartinform, 2019. II. 6 p.
8. Muravskaia N.P., Lazarenko E.R. O metrologicheskom obespechenii v oblasti nerazrushaiushchego kontroliia [On metrological support of non-destructive testing]. Metrologiia. Metrologicheskoe obespechenie proizvodstva. [Metrology. Metrological support of production]. URL: <https://metrob.ru/html/Stati/metrolob/Muravskaya.html>.
9. GOST R 53697-2009 (ISO/TS 18173:2005). Kontrol' nerazrushaiushchii. Osnovnye terminy i opredeleniia [State Standard 53697-2009 (ISO/TS 18173:2005). Non-destructive testing. General terms and definitions]. Moscow: Standartinform, 2019. IV. 8 p.
10. Tsykunov N.V. Otsenka vyivliaemosti defektov v osnovnykh detaliakh dvigatelei metodami nerazrushaiushchego kontroliia [Evaluation of detectability of defects in critical engine parts by non-destructive testing methods]. Novye tekhnologicheskie protsessy i nadezhnost' GTD. Issue 10. Nekotorye voprosy obespecheniia prochnostnoi nadezhnosti perspektivnykh GTD. Nauchno-tekhnicheskii sbornik statei [New technological processes and GTE reliability. Issue 10. Some issues of ensuring strength reliability of advanced gas turbine engines. Collection of scientific and technical articles]. Edited by Yu.A. Nozhnitsky. Moscow: CIAM, 2015. P. 53–59.
11. Tsykunov N.V. Osobennosti obnaruzheniia treshchin v otverstiiakh diskov [Features of crack detection in disc holes]. Prochnost' i nadezhnost' gazoturbinnnykh dvigatelei. Sbornik nauchnykh trudov [Durability and reliability of gas turbine engines. Collection of scientific papers]. Edited by Yu.A. Nozhnitsky. Moscow: CIAM, 2020. P. 66–70.
12. Tsykunov N.V., Yakubin S.P., Malinovskii E.K. Razrabotka eksperimental'nykh modelei diskov s treshchinami i provedenie issledovaniia vyivliaemosti defektov metodami nerazrushaiushchego kontroliia v zonakh konstruktivnykh osobennostei diskov i v neraz'emnykh soedineniiah rotorov GTD [Development of experimental disk models with cracks and research of defect detection by non-destructive testing methods in design features of disks and permanent joints of GTE rotors]. Osnovnye rezul'taty nauchno-tekhnicheskoi deiatel'nosti TsIAM (2017) [Main results of CIAM's scientific and technical activities (2017)]. Under the general editorship of M.V. Gordin, A.I. Lanshin, M.Ya. Ivanov. Moscow: CIAM, 2018. P. 599–602.

Материалы получены редакцией 30.09.2021