

УДК: 620.179.1: 538.54+621.431.75

ДЕФЕКТОСКОПИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В ДЕТАЛЯХ ГТД ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ

© 2012 А. М. Портер, С. А. Букатый, Д. П. Лёшин, М. В. Васильчук, А. А. Галицкий

Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск

В статье представлены результаты исследований по повышению эффективности и надёжности вихретокового метода контроля и отработки методики и технологии дефектоскопии.

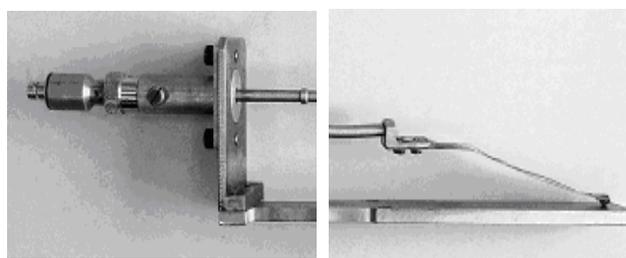
Дефектоскопия, вихретоковый контроль, усталостные трещины, детали ГТД, фрактографические исследования, полётный цикл, периодичность контроля.

В настоящее время широко используется эксплуатация авиадвигателей по техническому состоянию. Такой подход возможен только при наличии технологии и оборудования для достаточно надёжного контроля и выявления усталостных трещин и других дефектов в основных деталях ГТД. Согласно действующей инструкции на проведение вихретокового контроля (ВТК) дисков 1 ступени компрессора низкого давления (КНД) при эксплуатации двигателей Д-30КП/КУ-154, разработанной ГосНИИ ГА и ОАО «НПО «Сатурн», контроль указанным методом с помощью дефектоскопа Д-5 с вихретоковым преобразователем 658 55 690 (рис. 1, а, б) позволяет обнаруживать трещины длиной 2 мм и более по заднему торцу

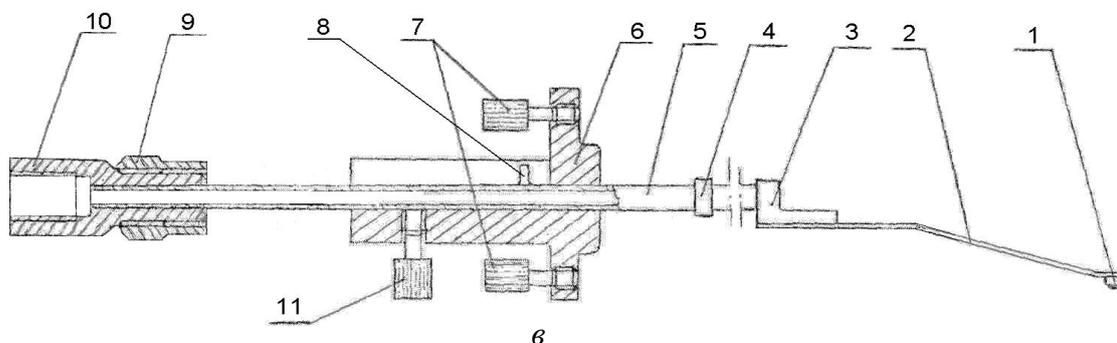
обода диска. Однако минимальный размер выявляемой трещины не был в достаточной степени подтверждён. Например, в процессе испытаний диска на разгонном стенде при проведении очередного ВТК на поверхности заднего торца обода зафиксировано срабатывание автоматической сигнализации дефекта (АСД) по трещине протяжённостью ~0,5 мм. В данной работе представлены результаты исследований по повышению эффективности и надёжности контроля и определению минимального размера выявляемых усталостных трещин, а также отработки методики и технологии их надёжной дефектоскопии с помощью дефектоскопа Д-5 с вихретоковым преобразователем 658 55 690.



а



б



в

Рис.1. Вихретоковый дефектоскоп Д-5:

а – дефектоскоп Д-5; б – узел крепления вихретокового преобразователя 658 55 690;

в – схема узла крепления вихретокового преобразователя:

1 – корпус вихретокового преобразователя; 2 – плоская пружина; 3 – переходник; 4 – упор; 5 – трубка;
6 – фланец; 7 – винты крепления фланца к смотровому лючку; 8 – ось; 9 – регулировочная гайка с 16-ю делениями; 10 – втулка; 11 – стопорный винт

Объектом исследований был диск 1 ступени КНД с усталостной трещиной в левом углу (вид по полёту) замкового паза протяжённостью ~0,5 мм по заднему торцу обода диска в радиальном направлении. Размер трещины установлен по данным контроля ЛЮМ1-ОВ (рис. 2). Исследования проводили как в процессе стендовых испытаний на установке УИР-3 (ОАО «НПО «Сатурн»), так и натуральных испытаний на двигателе Д30-КУ 154.

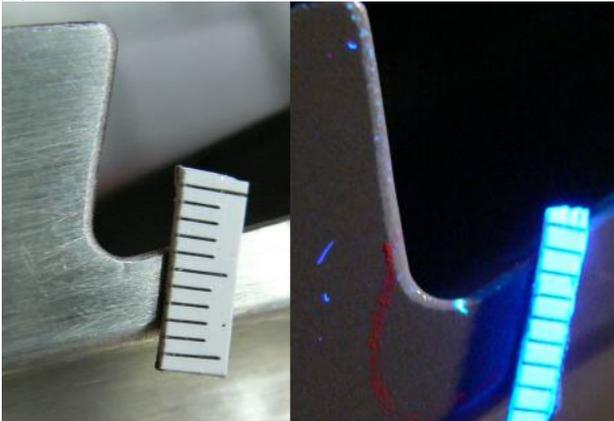


Рис. 2. Результаты визуального и ЛЮМ контроля левого угла паза диска 1 ступени КНД

Основными факторами, связанными с возможностью выявления трещин, являются:

- изменение электропроводности материала при наличии поверхностных и подповерхностных трещин на глубине 0,4 мм (приблизительная глубина проникновения вихревых токов в титане);
- наличие дефектной зоны с изменённой электропроводностью ниже трещины;
- характеристики применяемого оборудования, включая ширину поля чувствительного элемента – вихретокового преобразователя (ВТП), позволяющего фиксировать дефект, даже не пересекая его;
- изменение радиуса поля чувствительного элемента ВТП при увеличении скорости вращения диска в процессе контроля (в действующей инструкции на проведение ВТК рекомендована скорость 1-2 об/мин).

Для выяснения того, какой из факторов оказывает определяющее влияние на выявляемость естественных трещин, была проведена опытная работа, включающая следующие этапы:

1. Работы на диске в лаборатории неразрушающих методов контроля (НМК) по сравнительному анализу амплитуд сигналов

дефектоскопа Д-5 при прохождении ВТП дефектного и бездефектного пазов на различных расстояниях от левого угла паза.

2. Опытные работы в лаборатории НМК на эталонном диске, имеющем искусственные дефекты (ИД) 0,5, 0,7; 1,0; 1,5 мм по сравнительному анализу амплитуд сигналов дефектоскопа Д-5 при прохождении ВТП дефектных и бездефектных пазов на различных расстояниях от левого угла паза.

3. Определение радиуса поля чувствительного элемента ВТП 658 55 690 на основании результатов работ, полученных в пп. 1 и 2 (применительно к конкретной задаче контроля заднего торца диска).

4. Работы на собранном модуле с эталонным диском для подтверждения результатов опытных работ, полученных по пп. 1 и 2:

- определение величины максимального смещения ВТП по торцу диска в радиальном направлении, при котором сигнал от дефекта уменьшается с уровня, соответствующего положению ВТП, когда прекращается срабатывание сигнализации наличия дефекта от углов лопаточных пазов, до уровня на границе порога срабатывания АСД – 1 деление экрана дефектоскопа;
- построение зависимости размера выявленной трещины от скорости вращения диска.

С целью уточнения минимального размера надёжно выявляемой трещины проводили следующие мероприятия:

- увеличение скорости прокрутки диска при выполнении контроля;
- повышение точности позиционирования ВТП на заднем торце диска;
- введение дополнительного отраслевого стандартного образца для вихретокового контроля (ОСО-ВД), гарантирующего слежение за качеством ВТП в течение срока его годности при ежедневном контроле.

Для проведения работ по оценке выявляемости естественной трещины были разработаны и изготовлены: специализированное приспособление (рис. 1, в), обеспечивающее жёсткое крепление и плавное поступательное перемещение ВТП по торцу диска в радиальном и окружном направлениях, а также эталонный диск с имитаторами трещин длиной 0,5; 0,7; 1,0 и 1,5 мм (рис. 3).

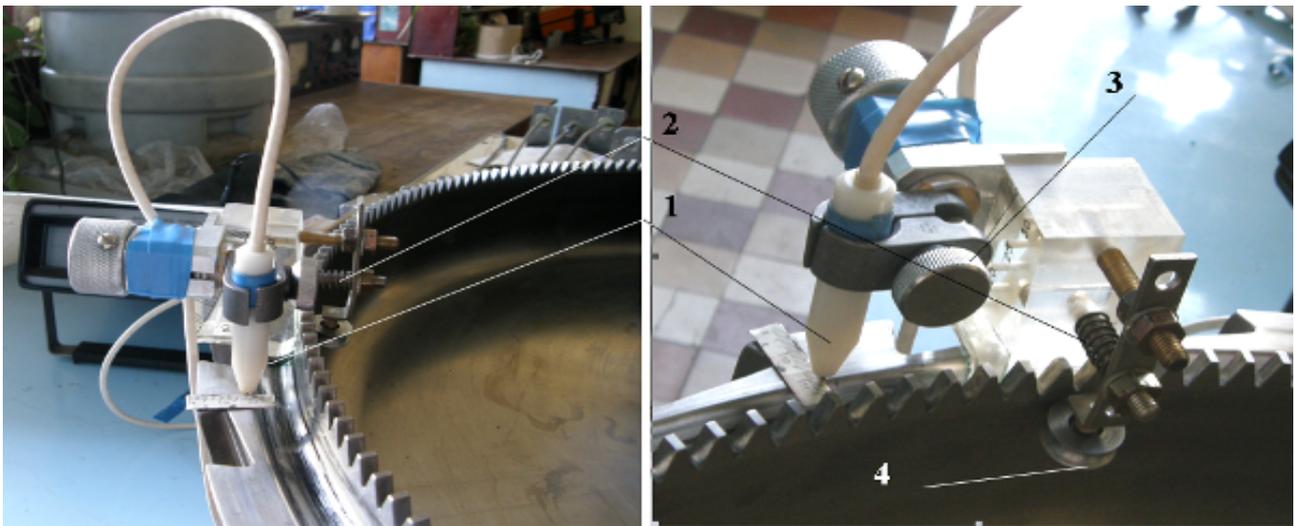


Рис. 3. Приспособление для ВТК трещин:

1 – ВТП; 2 – пружина для поджатия устройства крепления ВТП к поверхности диска; 3 – регулятор перемещения; 4 – колесо для плавного движения ВТП вдоль торца

Повышение точности положения датчика на заднем торце обода дисков достигнуто за счёт уменьшения шага резьбы регулировочной гайки (рис. 1, поз. 9), ограничивающей ход ВТП при настройке его положения до 0,5 мм и нанесения на ней 16 меток через равные угловые расстояния. Это позволило проводить отстройку от срабатывания АСД на углах пазов пошагово, поворотом регулировочной гайки на одно деление за один шаг, что соответствует радиальному перемещению датчика на 0,03 мм.

На рис. 4 схематично показано изменение положения ВТП на торце диска при настройке и проведении контроля. Точка «А» соответствует положению ВТП, при котором происходит срабатывание АСД на углах пазов. Смещение ВТП от точки «А» к точке «А'» приводит к прекращению срабатывания АСД от углов пазов. Точка «Б» соответствует положению ВТП, при котором кончик дефекта находится на границе радиуса поля чувствительного элемента, обеспечивая срабатывание АСД. Расстояние от точки «А'» до точки «Б» – зона, где происходит срабатывание АСД только от дефекта. Для обеспечения обнаружения дефекта расстояние между точками «А» и «Б» должно быть гарантированно больше шага перемещения ВТП. Результаты исследований зависимости размеров искусственных дефектов (ИД) от величины смещения ВТП при повороте регулировочной гайки от оптимального положения, выявляемые по срабатыванию АСД, приведены в табл. 1.

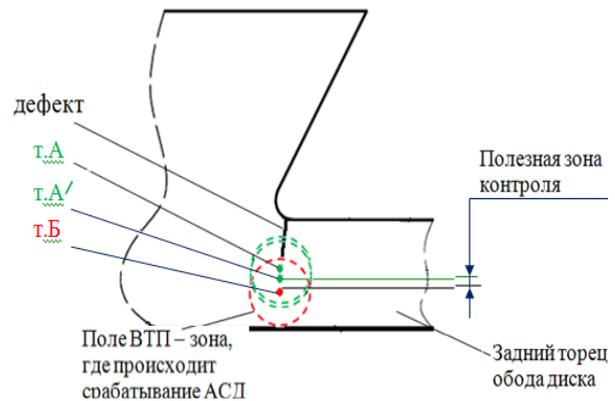


Рис. 4. Схема положения ВТП на торце обода диска при настройке и проведении ВТК

Таблица 1. Размер выявляемых искусственных дефектов в зависимости от величины смещения ВТП при скорости вращения диска 6 об/мин

Размер ИД, мм	Величина смещения ВТП, мм	Количество делений при повороте регулировочной гайки
1,5	0,9	30
1,0	0,45	15
0,7	0,15 – 0,20	5 – 7
0,5	0,03 – 0,05	1

Сравнительный анализ амплитуд сигналов от естественной трещины и ИД при различных положениях ВТП показал, что при сопоставимых размерах естественная трещина выявляется лучше за счёт наличия зоны с изменённой электропроводностью

под кончиком трещины и меньшего раскрытия трещины. При этом наибольшее влияние на выявляемость трещин малого размера оказывает величина поля ВТП.

В результате исследований с эталонным диском, имеющим искусственные надрезы различной протяжённости по заднему торцу обода (0,5; 0,7; 1,0 и 1,5 мм), было установлено, что увеличение скорости прокрутки диска при контроле с 1 до 6 об/мин повышает чувствительность метода контроля – размер выявляемого дефекта снижается с 1 мм до 0,5 мм (рис. 5). Увеличение скорости вращения свыше 6 об/мин практически не влияло на чувствительность метода.

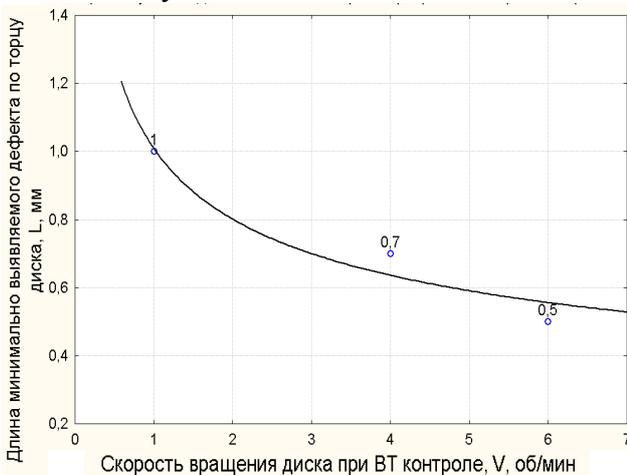


Рис. 5. График зависимости длины дефекта (трещин) в диске 1 ст. КНД от скорости вращения диска

Следующим этапом является оценка скорости роста трещины и назначение безопасного интервала контроля дисков в эксплуатации. С целью идентификации усталостного механизма разрушения дисков в эксплуатации и исследования закономерностей развития усталостных трещин в НПО «Сатурн» проведены испытания двух дисков на установке УИР-3 с имитаторами рабочих лопаток до образования трещин в лопаточном пазу. Дальнейшее циклическое нагружение осуществляли с контролем роста длины трещин до критической величины.

При проведении эквивалентно-циклических испытаний (ЭЦИ) серийного диска на малоцикловую усталость (МЦУ) применялись трапецеидальные циклы нагружения отнулевого типа. Контроль за ростом трещины осуществлялся с начальной длины ~ 4,2 мм, соответствующей нижнему краю задней торцевой поверхности обода до протяженности её в радиальном направлении

~ 20 мм. При этом диск ещё сохранял запас по несущей способности. Период роста трещины на указанном участке составил 135 циклов с выдержкой 2 минуты на максимальном уровне нагружения, соответствующем максимальной частоте вращения двигателей Д-30КП на взлётном режиме в типовом полётном цикле (ТПЦ).

Испытания второго диска, доработанного перепротяжкой с последующим упрочнением лопаточных пазов микрошариками, проводилось в условиях, воспроизводящих ТПЦ двигателя Д-30КУ-154. Контроль за ростом трещины МЦУ, полученной в результате ЭЦИ, осуществлялся с начальной длины трещины ~3 мм до протяженности её в радиальном направлении ~15 мм. При этом диск сохранял запас по несущей способности. Так как к началу испытаний трещина уже имела значительную глубину, указанная доработка поверхности обода диска не оказала существенного влияния на кинетику трещины в процессе испытаний. Период роста трещины на участке с 3 мм до нижнего края торца обода составил 100 циклов, за пределами края торца обода - 64 цикла.

По окончании испытаний на УИР-3 из дисков были вырезаны фрагменты с усталостными трещинами, которые были подвергнуты статическому долому для последующего проведения в ФГУП «ЦИАМ» и ФГУП «ВИАМ» фрактографических и металлографических исследований. Сопоставление полученных результатов с результатами ранее проведённых исследований дисков, разрушившихся в эксплуатации, показало, что скорость роста трещины во всех исследованных дисках (опытных и с двигателями) на контролируемом участке с 2 мм до нижнего края задней торцевой поверхности обода ~ 4,2 мм составила ~ 0,01 мм на 1 полётный цикл [1].

Поскольку в процессе испытаний дисков на установке УИР-3 используются имитаторы, не позволяющие моделировать вибрационные колебания лопаток (рис. 6), то дополнительно проведены по ТПЦ испытания по оценке скорости роста трещин на диске в составе полноразмерного двигателя. Эти испытания полностью подтвердили идентичность характера разрушения и скорости роста трещин в процессе испытаний на полноразмерном двигателе и на установке УИР-3 [1].

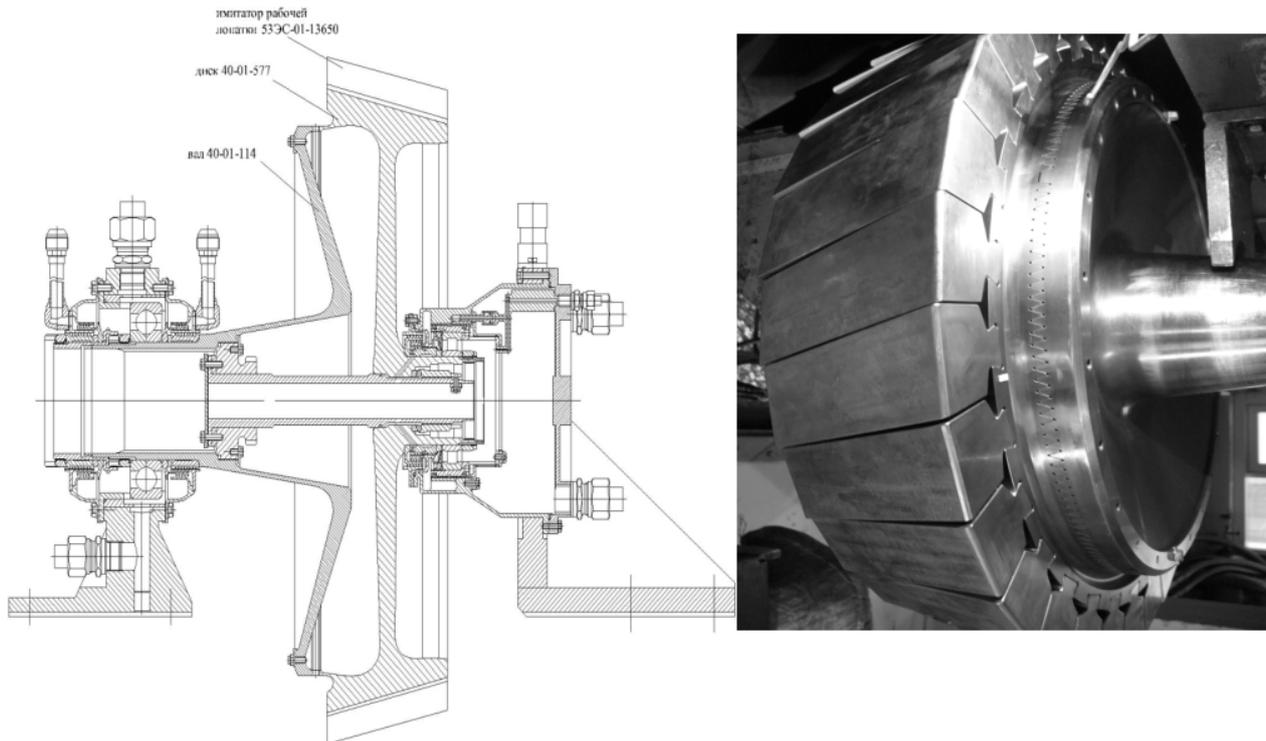


Рис. 6. Элемент установки УИР-3 для испытания дисков с имитаторами лопаток

В результате данных исследований по методике, рекомендованной в [2], получена расчётная оценка максимально допустимой наработки $[N]$ между последовательными операциями контроля состояния диска в эксплуатации:

$$[N] = \frac{2N_f}{3K_N} = \frac{2 \cdot 264}{3 \cdot 2} = 88 \text{ полётных циклов,}$$

где $N_f = 264$ цикла – количество циклов развития трещины, соответствующее потере функциональной способности дисков (200 циклов определено на основании фрактографического анализа кинетики роста длины трещины с 2 до 4,2 мм и 64 цикла в процессе роста длины трещины с 4,2 до 15 мм); $K_N = 2$ – коэффициент запаса по циклам.

По окончании испытаний указанных дисков изломы по вскрытым трещинам были направлены для исследования в Государственный центр безопасности полётов воздушного транспорта (ГЦ БП ВТ). По результатам выполненных в ГЦ БП ВТ фрактографических исследований сделано заключение о процессе распространения трещин в дисках в условиях эксплуатации [3]:

- на длине трещины $\sim 0,5$ мм по контролируемой поверхности её рост происходит за один ТПЦ на величину $\sim 0,01$ мм;
- при достижении длины $\sim 1,2$ мм рост трещины за один ТПЦ составляет $0,021$ мм;

– с момента вероятного выявления трещины длиной более 1,2 мм до размера ~ 2 мм по задней торцевой поверхности обода количество полётных циклов составит

$$(2 - 1,2) : 0,021 = 0,8 : 0,021 = 38 \text{ циклов;}$$

– с учётом того, что после достижения длины 2 мм рост трещины в эксплуатации до разрушения происходит не менее чем за 12 полётов, общее количество полётных циклов с момента достижения трещиной длины около 1,2 мм и до момента окончательного разрушения диска составит $38 + 12 = 50$ полётов.

На основании полученных результатов зависимость для определения количества полётных циклов N_{Σ} , составляющих периодичность контроля дисков, можно представить в следующем виде:

$$N_{\Sigma} = N_{\text{ВТК} \div 1,2\text{мм}} + N_{1,2 \div 2\text{мм}} + N_{2 \div \text{ПФС}},$$

где $N_{\text{ВТК} \div 1,2\text{мм}}$ – период роста трещины от длины, надёжно выявляемой ВТК, до 1,2 мм с учётом скорости роста трещины на данном участке $0,01$ мм на 1 полётный цикл; $N_{1,2 \div 2\text{мм}} = 0,8 : 0,021 = 38$ циклов – период роста трещины на участке от 1,2 мм до 2 мм с учётом скорости роста трещины на данном участке $0,021$ мм на 1 полётный цикл; $N_{2 \div \text{ПФС}} = 12$ циклов – число циклов за период роста трещины с 2 мм до потери работоспособности дисков.

В итоге, с учётом выявляемости трещин методом ВТК и рекомендованного ГЦ БП ВТ двукратного запаса по периодичности контроля, получены следующие безопасные интервалы вихретокового контроля дисков:

– для минимальной длины трещины 0,5 мм

$$N_f = \frac{N_\Sigma}{2} = \left(\frac{1,2 - 0,5}{0,01} + 38 + 12 \right) \frac{1}{2} = 60 \text{ полёт-}$$

ных циклов;

– для минимальной длины трещины 0,7 мм

$$N_f = \frac{N_\Sigma}{2} = \left(\frac{1,2 - 0,7}{0,01} + 38 + 12 \right) \frac{1}{2} = 50 \text{ полёт-}$$

ных циклов.

Поскольку оценка безопасного интервала ВТК дисков, выполненная согласно рекомендациям ГЦ БП ВТ, даёт более консервативный результат по сравнению с предыдущей, принято использовать её для уточнения периодичности контроля дисков. Тогда с учётом возможности гарантированного выявления трещин длиной 0,7 мм по торцу обода диска, подтверждённой апробированием уточнённой методики, для обеспечения безаварийной эксплуатации достаточен периодический ВТК дисков с интервалом 50 полётных циклов.

Выводы

1. На основе исследований влияния положения ВТП относительно концентраторов напряжений на показания дефектоскопа Д-5 определена величина полезной зоны и шага перемещения ВТП при контроле дисков ГТД.

2. Установлена оптимальная скорость перемещения ВТП в процессе контроля (скорость вращения дисков), обеспечивающая минимальный размер – 0,5 мм выявляемых усталостных трещин по заднему торцу обода диска.

3. Подтверждена идентичность процессов развития и скорости роста трещин в дисках при испытаниях по ТПЦ на ГТД и на установке УИР-3; определена зависимость количества циклов до потери несущей способности дисков от минимально-выявляемой величины усталостной трещины.

4. На основании проведённых исследований установлена безопасная периодичность контроля дисков при эксплуатации ГТД.

Библиографический список

1. Заключение о периодичности контроля в эксплуатации дисков первой ступени КНД двигателей Д-30КУ/КП/КУ-154. ОАО «НПО «Сатурн», ФГУП «ЦИАМ», ФГУП «ВИ-АМ», ФГУП ГосНИИ ГА, –2010. - 6 с.

2. Временное положение об установлении и увеличении ресурсов и сроков службы газотурбинных двигателей гражданской авиации, их агрегатов и комплектующих изделий. ГНЦ РФ ФГУП «ЦИАМ имени П.И.Баранова». –2006. - 80 с.

3. Заключение № 9512-СИ/106 Испытания диска первой ступени КНД 40-01-577 с двигателя Д-30КУ-154 № 395-433. Фрактографическое исследование изломов по вскрытой трещине в ободу диска. ГЦ БП ВТ. –М.: –2012. - 19 с.

THE DEFECTOSCOPY OF THE FATIGUE CRACKS IN THE GAS TURBINE PARTS BY MEANS OF EDDY-CURRENT METHOD

© 2012 A. M. Porter, S. A. Bukatyi, D. P. Leshin, M. V. Vasilchuk, A. A. Galickyi

”NPO "Saturn" Corporation, Rybinsk

The results of research in the sphere of enhancement of efficiency and reliability of the eddy current testing and determination of the minimal size of the revealed fatigue cracks are presented here. The most essential factors influencing on the detectability of the fatigue crack are researched. The methods and technology of the reliable defectoscopy are developed by means of defectoscope D-5.

Defectoscopy, eddy-current inspection, fatigue cracks, gas turbine parts, defectoscopy interval.

Информация об авторах

Портер Александр Маркович, кандидат технических наук, начальник конструкторского отдела анализа и управления ресурсом, Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск. E-mail: aleksandr.porter@npo-saturn.ru; alporter@rambler.ru. Область научных интересов: остаточные напряжения и деформации, упрочняющие технологии, расчёты на прочность.

Букатый Станислав Алексеевич, доктор технических наук, профессор, Рыбинский государственный авиационный технический университет. E-mail: bukaty_sa@mail.ru. Область научных интересов: Область научных интересов: остаточные напряжения и деформации, упрочняющие технологии, малоцикловая усталость, механика разрушения.

Лёшин Дмитрий Павлович, инженер-конструктор отдела анализа и управления ресурсом, Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск. Область научных интересов: малоцикловая усталость, прочность.

Васильчук Максим Владимирович, кандидат технических наук, начальник конструкторско-технологического бюро неразрушающих методов контроля, Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск. E-mail: maksim.vasilchuk@npo-saturn.ru. Область научных интересов: остаточные напряжения и деформации, упрочняющие технологии, методы неразрушающего контроля.

Галицкий Анатолий Анатольевич, ведущий инженер-технолог конструкторско-технологического бюро неразрушающих методов контроля, Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск. Область научных интересов: остаточные напряжения и деформации, упрочняющие технологии, методы неразрушающего контроля.

Porter Alexander Markovich, Candidate of Technical Sciences, Chief of Design Department of the Analysis and Management of a Resource "NPO "Saturn" Corporation. E-mail: aleksandr.porter@npo-saturn.ru; alporter@rambler.ru. Area of research: gas Turbine reliability and durability, low-cycle fatigue and long-term strength.

Bukaty Stanislav Alekseevich, Doctor of Technical Sciences, Professor Rybinsk State Aviation Technical University University in the name of P.A. Solovyev. E-mail: bukaty_sa@mail.ru. Area of research: residual stress and strains, strengthening technologies, low-cycle fatigue, fracture mechanics.

Leshin Dmitriy Pavlovich, Chief engineer of the Analysis and Management of a Resource "NPO "Saturn" Corporation. Area of research: gas Turbine reliability and durability, low-cycle fatigue and long-term strength.

Vasilchuk Maksim Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Head of Design and Technology Bureau of non-destructive testing "NPO "Saturn" Corporation. E-mail: maksim.vasilchuk@npo-saturn.ru. Area of research: gas Turbine reliability and durability.

Galickyi Anatoliy Anatolievich, Chief engineer of Design and Technology Bureau of non-destructive testing "NPO "Saturn" Corporation. Area of research: gas Turbine reliability and durability.