

На правах рукописи



ЯБЛОКОВА НАТАЛЬЯ АЛЕКСАНДРОВНА

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ДЕТАЛЕЙ
ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

Специальность: 05.16.09 – материаловедение (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Трофимов Валерий Васильевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор,
Титовец Юрий Федорович

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Барахтин Борис Константинович

Ведущая организация: ОАО «Климов»

Защита состоится **“21” февраля 2012 г. в 16 ч.** на заседании диссертационного совета Д 212.229.19 в ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет по адресу: **195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, лабораторно-аудиторный корпус, кафедра «Машины и технология обработки металлов давлением».**
Факс: (812) 552-67-26 e-mail: yabl-natalya@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан — **“18” января 2012 г.**

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Востров В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современное производство газотурбинных двигателей (ГТД) авиационного и наземного применения не представляется возможным без анализа и экспериментального исследования напряженно – деформированного состояния (НДС) деталей ГТД. Для оценки и обеспечения надежной работоспособности ГТД в целом большое значение имеет анализ напряжений и деформаций в наиболее нагруженных и ответственных деталях – на лопатках и дисках ГТД. Исследование остаточных напряжений (ОН) проводится на поверхностях деталей в зонах концентраторов напряжений - это замки, полки, кромки лопаток, межпазовые выступы дисков и т.д. ОН в значительной степени определяют качество ГТД и его ресурс. Анализ НДС деталей ГТД в процессе изготовления и после эксплуатации методами рентгеноструктурного анализа (РСА) позволяет установить критерии оценки ресурса.

Анализ литературы показал, что отсутствует единая методология контроля НДС на деталях машиностроительной отрасли методом РСА с учетом многих факторов (текстура, градиенты напряжений, многофазная структура), влияющих на точность измерения напряжений, отсутствует практическое применение методик РСА при сложном напряженном состоянии в реальных изделиях ГТД. Развитие метода РСА, включая анализ требований стандартов в этой отрасли требует разработки новых методик комплексного исследования параметров напряженного состояния материалов и других параметров, которые определяют формирование НДС и повышение ресурса деталей ГТД.

Проблема решения вопроса оценки долговечности и ресурса, определения критериев оценки «преддефектного» состояния деталей ГТД на основе анализа НДС и параметров структуры методами РСА является актуальной.

Объект и предмет исследования: лопатки и диски авиационных ГТД, способы обработки деталей ГТД из никелевых и титановых сплавов.

Целью диссертационной работы является повышение ресурса особо ответственных деталей ГТД на основе анализа напряженно-деформированного и структурного состояния поверхностных слоев лопаток и дисков ГТД в зонах концентраторов напряжений методами рентгеноструктурного анализа.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- разработать комплексную методику РСА для исследования и контроля НДС деталей ГТД;
- исследовать влияние различных технологических операций обработки лопаток и дисков авиационных двигателей на формирование НДС в поверхностном слое материала;
- определить оптимальные технологические параметры рентгено съемки дисков и лопаток;
- разработать эталонные образцы с мерами оценки уровня ОН методами РСА, обеспечивающих выполнение требований стандартов в машиностроении;

- разработать программы автоматизированного расчета компонентов тензора напряжений и структурных параметров, на основании которых предложить способ оценки остаточного ресурса ремонтных дисков компрессора методами РСА.

Научная новизна:

- Разработана комплексная методика для анализа НДС поверхностных слоев деталей методами РСА для применения в технологиях производства ГТД.
- Определены критерии качества лопаток турбин и компрессоров, повышающие ресурс ГТД.
- Предложены критерии оценки остаточного ресурса дисков компрессора низкого давления из сплава ВТЗ-1 по измерению ОН неразрушающим способом.
- Разработан способ определения интегрированного структурного параметра, позволяющий определить стадию «преддефектного» состояния материала ремонтного диска.
- Методом РСА определено напряженное состояние диска компрессора высокого давления из сплава ВТЗ-1, разрушенного в эксплуатации. Показано, что в зонах разрушения диска деформации описываются эллиптической функцией $\varepsilon = f(\sin^2 \psi)$, что означает наличие объемно-деформированного состояния в приповерхностных слоях диска.

Практическая значимость

Результаты исследования данной диссертационной работы отражены в стандартах авиационного предприятия ОАО «НПО»Сатурн» для анализа НДС деталей ГТД методами РСА. Стандартизация методов анализа ОН на деталях ГТД позволяет установить единые требования по использованию методологии проведения измерений и обработки экспериментальных данных, а анализ экспериментальных результатов исследования НДС деталей ГТД позволяет оптимизировать производственные процессы изготовления и ремонта ГТД.

Созданы внешние эталоны с заданным уровнем напряжений, испытанных в аттестованных лабораториях «Snecma Moteurs» (Франция), «Stresstech» (Финляндия) и ОАО «НПО»Сатурн» (Россия). Создание эталонных образцов (внешних эталонов) с мерой напряжений позволили аттестовать технологические процессы изготовления двигателей SAM-146, Д30КУ-КП-КУ154.

Полученные критерии оценки степени повреждения ремонтных дисков КНД из сплава ВТЗ-1 по изменению параметров напряженного и структурного состояния материала дисков, определенных методами РСА, позволяют неразрушающим способом определять «преддефектное» состояние ремонтных дисков двигателей Д30КУ/КП/КУ-154 с различной наработкой в эксплуатации.

Положения, выносимые на защиту:

- Комплексная методика анализа напряженно-деформированного состояния деталей ГТД.

- Результаты определения напряженно-деформированного состояния лопаток и дисков компрессора авиационного двигателя из титанового сплава ВТЗ-1 методами РСА.
- Методики и результаты оценки «преддефектного» состояния ремонтных дисков КНД из титанового сплава ВТЗ-1 по определению интегрированного структурного параметра неразрушающими методами РСА.
- Результаты определения напряженно-деформированного состояния жаростойкого покрытия Al-Y-Si лопаток турбины авиационных двигателей из жаропрочного никелевого сплава ЖСБУВи.
- Результаты определения напряженно-деформированного состояния лопаток турбины авиационных двигателей из жаропрочного никелевого сплава ЖСБК после глубинного шлифования.

Достоверность результатов работы обеспечивается использованием фундаментальных положений физики твердого тела, большим объемом экспериментов, выполненных с привлечением современных методов исследования (стандартных и специально разработанных), программного обеспечения для автоматического способа проведения измерений и обработки экспериментальных данных. Достоверность научных выводов и рекомендаций обеспечивается удовлетворительным согласованием расчетных и экспериментальных данных.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и результаты исследований докладывались и обсуждались на 6 научно-технических конференциях, в том числе на: Международной научно-практической конференции «XXXIX, XL неделя науки СПбГПУ», СПб., 2010,2011; на III Международной научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века», М., ЦИАМ, 2010; на VI Международной конференции «Фазовые превращения и прочность кристаллов»,Черноголовка, 2010; на научно-технической конференции «Создание и исследование конструкционных материалов для новой техники», М., ВИАМ ,2011; на XIX Всероссийской научно-технической конференции по неразрушающему контролю технической диагностике, Самара, 2011.

Публикации. Основное содержание работы отражено в 9 печатных работах, в том числе в 3 статьях в изданиях, входящих в список ВАК РФ. Библиографический список основных работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы Диссертационная работа состоит из 5 глав (включая введение и заключение) и содержит 169 страниц машинописного текста, 68 рисунков, 18 таблиц и список литературы из 91 наименования, 5 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель исследования, поставлены основные задачи. Показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, даны сведения об апробации работы.

В первой главе приведен обзор данных отечественных и зарубежных источников по методикам, посвященных по оценке ресурса деталей и конструкций машиностроения методами РСА. В работах описаны способы оценки ресурса деталей машиностроения по изменению напряженно-деформированного и структурного состояния. Показано, что НДС и параметры структуры определяют прочностные и эксплуатационные свойства деталей ГТД.

На точность определения величины компонентов напряжений на деталях ГТД методами РСА, влияет структура и фазовый состав, метрологические параметры измерительного оборудования, геометрия детали и шероховатость поверхности. Поэтому, методики определения компонентов напряжений методами РСА должны обеспечивать единую методологию обработки экспериментальных данных с учетом указанных факторов на точность измерения напряжений.

Вторая глава включает разработку комплексной методики анализа макронапряжений на деталях ГТД методами РСА, основанных на точном измерении периодов кристаллической решетки. Принцип измерения с помощью рентгеновского излучения основывается на законе Вульфа-Брэгга. При дифференцировании уравнения Вульфа-Брэгга получается соотношение:

$$\varepsilon_{\varphi,\psi} = \frac{(d_{\varphi,\psi} - d_0)}{d_0} = -(\theta_{\varphi\psi} - \theta_0) \operatorname{ctg} \theta_0, \quad (1)$$

где d_0 (θ_0) и $d_{\varphi,\psi}$ ($\theta_{\varphi\psi}$) – межплоскостные расстояния (углы Вульфа-Брэгга) для плоскостей (hkl) для недеформированного и деформированного материала.

В материале выбирают кристаллическую фазу, в которой будут определять напряжения. Для этой фазы измеряют положение или смещение дифракционной линии (hkl) в зависимости от углов φ и ψ именно так, как указано на рисунке 1.

Связь между деформацией и напряжением в любом направлении φ (азимутальный угол) определяется следующим соотношением (метод $\sin^2 \psi$):

$$\varepsilon_{\varphi,\psi} = \frac{1}{2} S_{2\{hkl\}} \cdot (\sigma_{\varphi} - \sigma_{33}) \cdot \sin^2 \psi + \frac{1}{2} S_{2\{hkl\}} \cdot \sigma_{33} + S_{1\{hkl\}} \cdot \operatorname{Tr}(\sigma) + \frac{1}{2} S_{2\{hkl\}} \cdot \tau_{\varphi} \cdot \sin(2\psi), \quad (2)$$

$$\operatorname{Tr}(\sigma) = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}; \quad \sigma_{\varphi} = (\sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{12} \sin 2\varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi);$$

$$\tau_{\varphi} = (\sigma_{13} \cos \varphi + \sigma_{23} \sin \varphi); \quad \frac{1}{2} S_2 = \frac{1+\nu}{E}; \quad S_1 = -\frac{\nu}{E}.$$

где ψ – угол между нормальными к поверхности образца и к плоскости отражения (hkl); $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ ($\sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{23}$) – нормальные (касательные) компоненты тензора напряжений; $\frac{1}{2}S_2$ и S_1 – рентгеновские постоянные упругости; E – модуль упругости, ν – коэффициент Пуассона.

Выражение (2) описывает эллиптическую зависимость $\varepsilon = f(\sin^2 \psi)$, если касательные компоненты тензора напряжений σ_{13} и σ_{23} не равны нулю.

При графическом представлении (рисунок 1б) формулы (2), применяются следующие обозначения:

$$\alpha = \frac{1}{2}S_2\{hkl\} \cdot (\sigma_\varphi - \sigma_{33}); \quad \varepsilon_{\varphi\psi=0} = \frac{1}{2}S_2\{hkl\} \cdot \sigma_{33} + S_1\{hkl\} \cdot Tr(\sigma); \quad A = \frac{1}{2}S_2\{hkl\} \cdot \tau_\varphi.$$

В традиционном методе исследования ОН $\sin^2 \psi$ принимается, что зависимость $\varepsilon = f(\sin^2 \psi)$ является линейной, без расхождения результатов измерения $\varepsilon = f(\sin^2 \psi)$ при положительных и отрицательных углах наклона $\pm \psi$ (без «расщепления» функции $\varepsilon = f(\sin^2 \psi)$ при углах наклона $\pm \psi$).

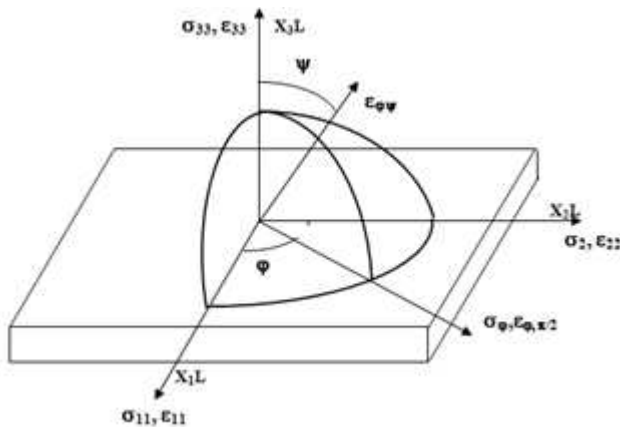


Рисунок 1 - Система отсчета, связанная с деталью для определения ОН методом РСА.

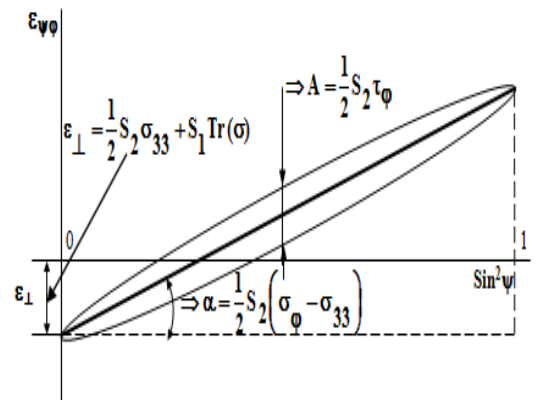


Рисунок 2 – Графическое представление закона $\sin^2 \psi$.

При решении практических задач часто это условие не выполняется. Для таких случаев Хаук и Дёлле предложили метод определения компонентов напряжений при определении $\varepsilon = f(\sin^2 \psi)$ с расщеплением $\pm \psi$ для значений $\varphi = 0^\circ$, $\varphi = 45^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$. Определяются два параметра a_1 и a_2 с помощью выражений:

$$a_1 = \frac{1}{2}[\varepsilon_{\varphi\psi+} + \varepsilon_{\varphi\psi-}] = \left\{ \frac{d_{\varphi\psi+} + d_{\varphi\psi-}}{2d_0} - 1 \right\} \quad (3)$$

$$= \{\varepsilon_{11} \cos^2 \varphi + \varepsilon_{12} \sin 2\varphi + \varepsilon_{22} \sin^2 \varphi - \varepsilon_{33}\} \sin^2 \psi + \varepsilon_{33}$$

$$a_2 = \frac{1}{2}[\varepsilon_{\varphi\psi+} - \varepsilon_{\varphi\psi-}] = \frac{d_{\varphi\psi+} - d_{\varphi\psi-}}{2d_0} = \{\varepsilon_{13} \cos \varphi + \varepsilon_{23} \sin 2\varphi\} \sin |2\psi|, \quad (4)$$

где $\psi_- = (-1) \cdot \psi_+$ и $\sin 2\psi_+ - \sin 2\psi_- = 2 \sin |2\psi|$.

Параметры a_1 и a_2 можно представить через компоненты напряжений ($\sigma_{33} = 0$):

$$a_1 := \frac{d_{\psi_+} + d_{\psi_-}}{2} = d_0 + \frac{1}{2} S_2 \cdot d_0 \cdot \sigma_\varphi \cdot \sin^2 \psi; \quad (5)$$

$$a_2 := \frac{d_{\psi_+} - d_{\psi_-}}{2} = \frac{1}{2} S_2 \cdot d_0 \cdot \tau_\varphi \cdot \sin 2\psi. \quad (6)$$

Для определения параметров a_1 и a_2 строятся графики зависимости $a_1 = f(\sin^2 \psi)$ для углов $\varphi = 0^\circ$, $\varphi = 45^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$ (линейная зависимость) и $a_2 = f(\sin 2\psi)$ для углов $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$ (эллиптическая зависимость). Значения a_1 и a_2 определяются способом аппроксимации для линейной и эллиптической зависимости.

Выражение (6) представим в виде эллиптической зависимости $a_2 = \pm 2B\sqrt{x-x^2}$, где $x = \sin^2 \psi$ и $B = 1/2 S_2 d_0 \tau_\varphi$. Таким образом, для определения компонентов касательных напряжений σ_{13} и σ_{23} требуется решить систему из двух уравнений с двумя неизвестными, для расчета компонентов напряжений $\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{22}$ (включая главные напряжения $\sigma_{max} = \sigma_{11} - \sigma_{33}$ и $\sigma_{min} = \sigma_{22} - \sigma_{33}$) - систему из трех уравнений с тремя неизвестными (для $\sigma_{33} = 0$).

В случае плоского напряженного состояния ($\sigma_{33} = 0$ и $\tau_\varphi = 0$), формула (2) упрощается:

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{1}{2} S_{2\{hkl\}} \cdot \sigma_\varphi \cdot \sin^2 \psi + S_{1\{hkl\}} \cdot \text{Tr}(\sigma) \quad (7)$$

Оборудование для анализа ОН и метрологические характеристики

На портативных специализированных анализаторах напряжений с ψ -модифицированным гониометром, где используются съемные дуги гониометра разного диаметра, калибровка решает две задачи: в первых, позволяет установить расстояние от коллиматора до исследуемой поверхности с учетом выбранной конфигурации измерительной системы, а во вторых определяет на дуге гониометра угловой диапазон по шкале 2θ . Для калибровки рентгеновского анализатора напряжений XSTRESS 3000 G3 применяли спеченные порошковые образцы (Ni, α -Ti, LaB₆ (ГСО ПРФ-12)). Результаты испытаний ГСО ПРФ-12 на рентгеновском анализаторе напряжений XSTRESS 3000 G3 с использованием излучения Ti-K_{α1} показали, что калибровка на угол $2\theta_{(022)} = 138,47^\circ$ может быть использована для аттестации измерений ОН на деталях ГТД из титановых сплавов, а калибровка по линии (122) на угол $2\theta_{(122)} = 165,27^\circ$ дает точные метрологические характеристики брэгговских углов

для проверки рентгеновского анализатора напряжений с применением ГСО 8631 ПРИ-7а (Al_2O_3).

В таблице 1 представлены результаты испытаний внешнего эталона («мера напряжений») из сплава ВТЗ-1 для аттестации измерений ОН на лопатках и дисках компрессоров в соответствии требованиям стандартов ХРА 09-285 и SAE International HS-784. При проведении испытаний внешнего эталона использовали режимы рентгено съемки (рисунок 3): излучение – $Cu - K_{\alpha}$ ($Ti - K_{\alpha}$), β – фильтр -Ni (нет фильтра), коллиматор -3мм (3 мм), осцилляции: $\Delta\psi = \pm 4^{\circ}$, ($\Delta\psi = \pm 4^{\circ}$), $1/2S_2 = 11,4 \text{ МПа}^{-1}$, ($1/2S_2 = 12,1 \text{ МПа}^{-1}$), $2\theta_{213} = 141^{\circ}$, ($2\theta_{110} = 139^{\circ}$), $\psi = 0, \pm 40^{\circ}$ ($\psi = 0, \pm 40^{\circ}$), количество наклонов $\pm \psi : +8/-8$ (+5/-5). Функция обработки пика: Гаусс (Гаусс), функция вычитания фона: линейная (параболическая), коррекция: LPA (LPA).

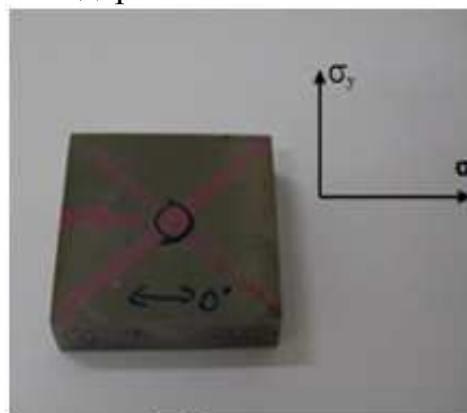


Рисунок 3 – Внешний эталон.

Таблица 1 - Результаты испытания внешнего эталона из сплава ВТЗ-1.

Параметр Лаборатория	«НПО»Сатурн»	Snecma (Франция)	Stresstech (Финляндия)
Остаточные напряжения σ_x , МПа	-399 ± 14 (-428 ± 20) [*]	-392 ± 6	-405 ± 9 (-414 ± 10) [*]
Остаточные напряжения σ_y , МПа	-437 ± 12 (-477 ± 25) [*]	-435 ± 9	-442 ± 14 (-447 ± 12) [*]

Примечание : * - измерение остаточных напряжений проведено на титановом излучении для отражающей плоскости (110) фазы $\alpha - Ti$, а все остальные измерения проводились на медном излучении для отражающей плоскости (213) фазы $\alpha - Ti$.

В третьей главе изложены результаты исследования НДС на лопатках ГТД из жаропрочных никелевых сплавов после нанесения покрытий и обработки глубинным шлифованием рентгеноструктурным и механическим методами.

В процессе анализа ОН в жаростойком покрытии ВСДП11 лопаток турбины из сплава ЖСБУВи проведены исследования структуры, элементного, фазового состава, параметров рентгеновского спектра и рентгеновской упругой постоянной. Анализ ОН в покрытии проводили по основной фазе покрытия $NiAl$, использовали режимы рентгено съемки: 1) излучение $Cr - K_{\alpha}$; линейный коэффициент ослабления $\mu = 84 \text{ мм}^{-1}$; $2\theta_{(211)} = 153^{\circ}$; глубина проникновения рентгеновских лучей в материал при $\psi = 0^{\circ}$ и $\psi = 40^{\circ}$ составляет $Z_{\text{макс}(\psi=0)} = 6 \text{ мкм}$ и $Z_{\text{мин}(\psi=40)} = 5 \text{ мкм}$; 2) $Ti - K_{\alpha}$, $2\theta_{(200)} = 144^{\circ}$, $\mu = 141 \text{ мм}^{-1}$, $Z_{\text{макс}(\psi=0)} = 3 \text{ мкм}$, $Z_{\text{мин}(\psi=40)} = 2 \text{ мкм}$.

Значение рентгеновской константы упругости $E/(1 + \nu)$, необходимое для расчета ОН от напряжений, измеренного при нормальном состоянии для плос-

костей (211) и (200) фазы покрытия лопатки $NiAl$ при использовании рентгеновского излучения $Cr - K_{\alpha}$ и $Ti - K_{\alpha}$, предварительно определено экспериментальным способом - с использованием простой балки прямоугольного сечения, изготовленной из материала лопатки с нанесением покрытия, нагруженной в четырехточечном изгибе на дифрактометре до известных уровней напряжений и с измерением полученного изменения межплоскостного расстояния плоскостей, в соответствии с ASTM E1426. Получены результаты рентгеновской постоянной упругости для отражающей плоскости (211) на излучении $Cr - K_{\alpha}$: $E/(1+\nu) = 90,5$ ГПа, для (200) на $Ti - K_{\alpha}$: $E/(1+\nu) = 67,8$ ГПа.

Формирование по глубине покрытия ВСДП11 лопаток ГТД из сплава ЖС6УВи остаточных напряжений сжатия с максимальной величиной на поверхности покрытия порядка -160 ± 40 МПа позволили обеспечить прочностные и эксплуатационные свойства лопатки при усталостных испытаниях.

При исследовании НДС на лопатках ГТД из сплава ЖС6К методами РСА после различных режимов обработки глубинным шлифованием (ГШ) были выявлены «крутые» градиенты напряжений. Для анализа напряженного состояния на этих лопатках после ГШ были разработаны методики, позволяющие делать поправку на величину остаточных напряжений из-за градиентов и различия в глубине активного слоя под углами Ψ . Использовали режимы рентгено съемки: излучение - $Mn-K_{\alpha}$, фаза Ni_3Al , $2\theta_{(311)} = 152 - 153^\circ$, угол наклона $\psi = \pm 40^\circ$, осцилляции по $\psi = \pm 4^\circ$, осцилляции по $\phi = \pm 10^\circ$, конфигурация гониометра для ПСИ модифицированного режима. Рентгеновская постоянная упругости $E/(1+\nu) = 152$ ГПа.

Анализ результатов остаточных напряжений на лопатках с применением методов РСА позволил выбрать оптимальный режим глубинного шлифования, для которого вдоль направления обработки и перпендикулярно ему действуют остаточные напряжения сжатия, близкие по величине. Повышение ресурса лопаток из сплава ЖС6К после различных режимов глубинного шлифования обеспечили оптимальные значения остаточных напряжений на исследованных лопатках, которые составляют от -350 до -550 МПа в направлении вдоль направления обработки глубинного шлифования и от -500 МПа до -800 МПа в направлении, перпендикулярном этому.

В четвёртой главе представлены результаты исследования лопаток компрессора высокого давления (КВД) из титанового сплава ВТ3-1 после обработки поверхности виброгалтовкой. Анализ НДС проводили на кромках пера лопатки (точка №1 – выходная кромка, точка №2-входная кромка) и в зоне перехода от пера к замку лопатки (точка №3) со стороны спинки и корыта.

Оборудование и режимы рентгено съемки: рентгеновский анализатор напряжений XSTRESS 3000 G3R с конфигурацией ψ – модифицированного гониометра, излучение $Ti - K_{\alpha}$, напряжение 25 кВ, сила тока 6мА, $D=50$ мм, фаза $\alpha - Ti$, $2\theta_{(110)} = 139^\circ$, $\Delta\psi = \pm 4^\circ$, $E/(1+\nu) = 83$ ГПа. Удаление поверхностных слоев проводили способом электрополирования прибором Movipol-3.

В зоне перехода от пера к замку лопатки со стороны корыта происходит уменьшение величины остаточных (рисунок 4) и главных напряжений сжатия. Характерна анизотропия напряженного состояния. Не выполняется линейность функции деформации $\varepsilon = f(\sin^2 \psi)$, наблюдается «расщепление» функции $\varepsilon = f(\sin^2 \psi)$ при углах наклона $\pm \psi$. Отсюда следует, что применяемый метод обработки поверхности лопаток виброгалтовкой формирует сложное напряженно-деформированное состояние в зоне перехода от пера к замку лопатки со стороны корыта и традиционные методики анализа напряжений методом $\sin^2 \psi$ не применимы. Для анализа НДС расчет компонентов тензора напряжений на лопатке КВД проводили методом Хаука-Дёлле (таблица 2). На выходной кромке и в зоне перехода от пера к замку лопатки со стороны корыта действуют значительные по величине касательные напряжения. Это обусловлено тем, что в этих зонах лопатки формирование ОН, в основном, происходит за счет режимов механической обработки поверхности, а не режимами упрочнения виброгалтовкой. На лопатках в зоне перехода от пера к хвостовику лопатки определено опасное напряженное состояние для условий эксплуатации.

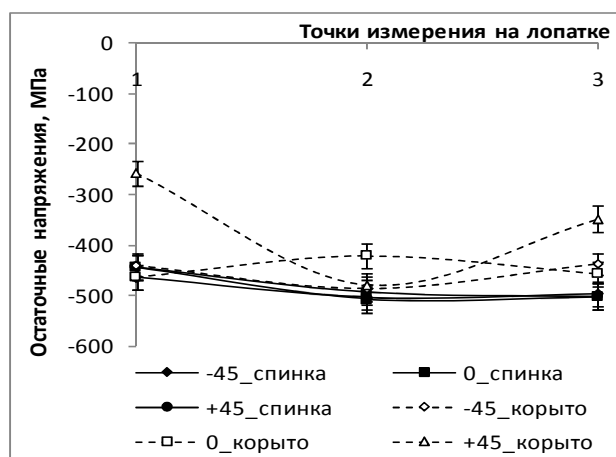


Рисунок 4 - Распределение ОН на поверхности лопатки КВД в точке №3.

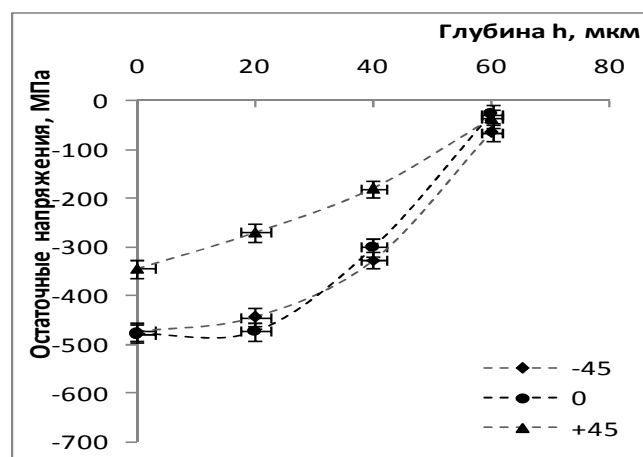


Рисунок 5 - Распределение ОН в приповерхностных слоях лопатки КВД в точке №3.

Таблица 2—Результаты расчета тензора напряжений на лопатке КВД, МПа.

область измерения точка измерения	Спинка	корыто
точка №1 (выходная кромка)	$\begin{pmatrix} -466 & -11 & 5 \\ -11 & -444 & 17 \\ 5 & 17 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -440 & 115 & -22 \\ 115 & -258 & -44 \\ -22 & -44 & 0 \end{pmatrix}$
точка №2 (входная кромка)	$\begin{pmatrix} -504 & 9 & -15 \\ 9 & -493 & 5 \\ -15 & 5 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -486 & -62 & -2 \\ -62 & -478 & 19 \\ -2 & 19 & 0 \end{pmatrix}$
точка №3 (зона перехода от пера к замку лопатки)	$\begin{pmatrix} -496 & 2 & 25 \\ 2 & -502 & 14 \\ 25 & 14 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -437 & 124 & 0 \\ 124 & -348 & 25 \\ 0 & 25 & 0 \end{pmatrix}$

На лопатке КВД из сплава ВТЗ-1 определена корреляционная зависимость между величиной микротвердости Hv и полушириной линии $B_{(110)}$:

$$Hv = 3,5 \cdot B_{110} + 225.$$

При исследовании диска КВД из сплава ВТЗ-1, разрушенного в эксплуатации функция $\varepsilon = f(\sin^2 \psi)$ в большинстве случаев описывает эллиптическую зависимость (рисунок б) и для неё характерно расщепление по $\pm \psi$.

Для установления реального НДС диска КВД в зоне очага разрушения определены компоненты тензора напряжений на полотне диска методом РСА: $\sigma_{11} = -232 \text{ МПа}$, $\sigma_{22} = -13 \text{ МПа}$, $\sigma_{12} = 9 \text{ МПа}$, $\sigma_{13} = -29 \text{ МПа}$, $\sigma_{23} = -45 \text{ МПа}$.

На ступице в окружном направлении диска измерены ОН растяжения. Максимальные главные напряжения растяжения, также определены на ступице диска перпендикулярно плоскости разрушения, т.е. в окружном направлении диска.

В пятой главе приведены основные результаты диссертации по исследованию НДС и структурного состояния дисков КНД. Предложен способ оценки остаточного ресурса ремонтных дисков на основе данных периодических исследований параметров напряжений и структурных параметров на ремонтных дисках и по критериям предельного состояния в зонах концентраторов напряжений. Зоны концентраторов напряжений на диске КНД изображены на рисунке 7. Схема измерения напряжений на диске КНД представлена на рисунке 8. Анализ НДС в пазах дисков КНД проводили разрушающим способом, а на торцах обода без разрушения диска.

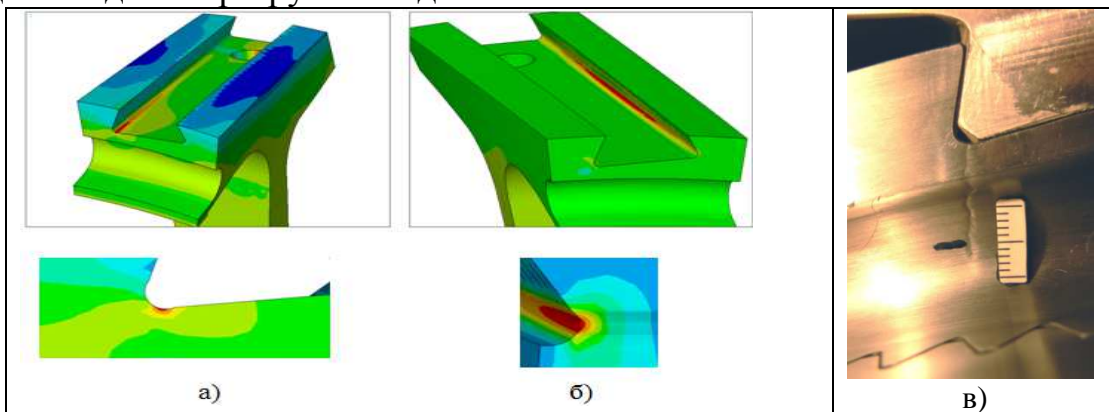


Рисунок 7- Опасные зоны концентрации напряжений на диске КНД: а) в районе заднего торца обода (на выходе диска) со стороны корыта лопатки; б) в середине паза со стороны спинки лопатки, в) задний торец обода дефектного диска.

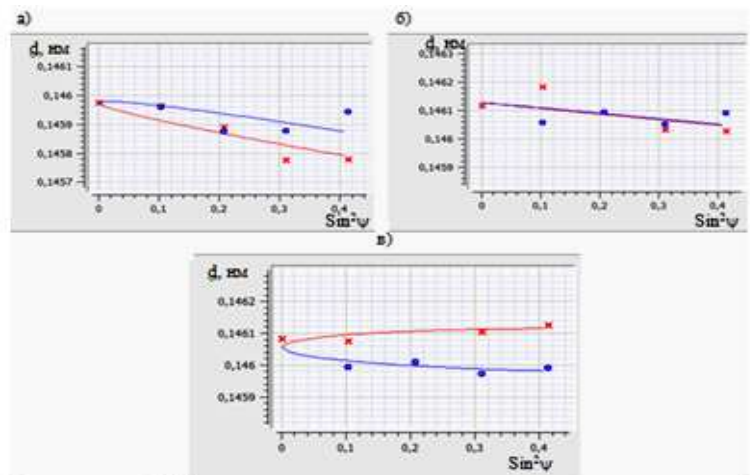


Рисунок 6. Изменение межплоскостного расстояния d от $\sin^2 \psi$ 10 олодне диске в зоне очага разрушения. а) $\varphi = 0^\circ$, б) $\varphi = 45^\circ$, в) $\varphi = 90^\circ$.

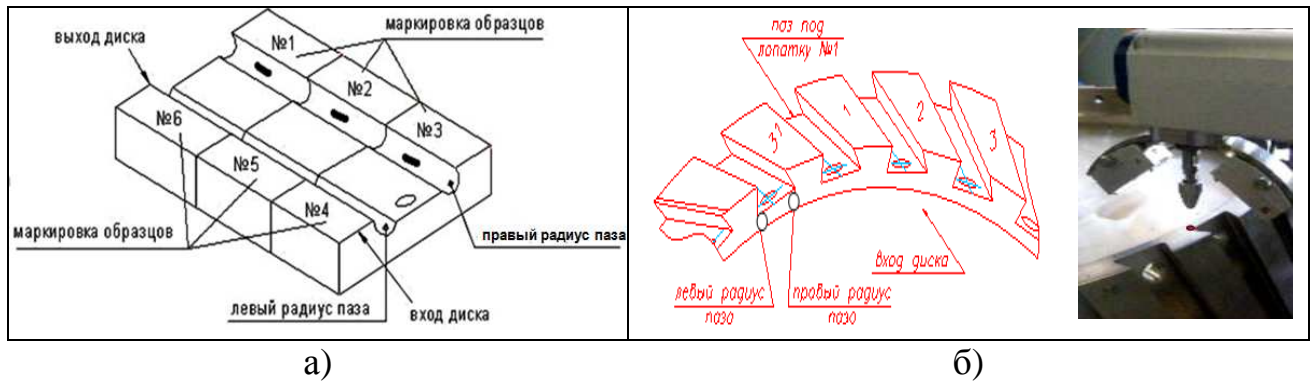


Рисунок 8 – Схема измерения параметров напряженно-деформированного и структурного состояния на диске КНД. а) в радиусе паза; б) на торцах обода.

Создание вдоль поверхности паза дисков КНД ОН сжатия после протягивания от -50 МПа до -220 МПа и после упрочнения дробеструйной обработкой - от -300 МПа до -450 МПа приводит к повышению ресурса диска в эксплуатации.

Величина остаточных напряжений в приповерхностных слоях радиуса паза диска КНД после протягивания паза вдоль и перпендикулярно пазу диска практически одинакова, что характеризует стабильность технологического процесса протягивания (рисунок 9а). При последующем упрочнении поверхности паза увеличивается величина и глубина залегания максимальных остаточных напряжений. На торцах обода диска после упрочнения распределение ОН в приповерхностных слоях в окружном и радиальном направлениях диска практически одинаково (рисунок 9б). Анализ ОН в радиусе паза в перпендикулярном направлении, в торцах обода – в окружном направлении позволяет получить наибольшую информацию при изучении и установлении критериев оценки ресурса дисков КНД в эксплуатации.

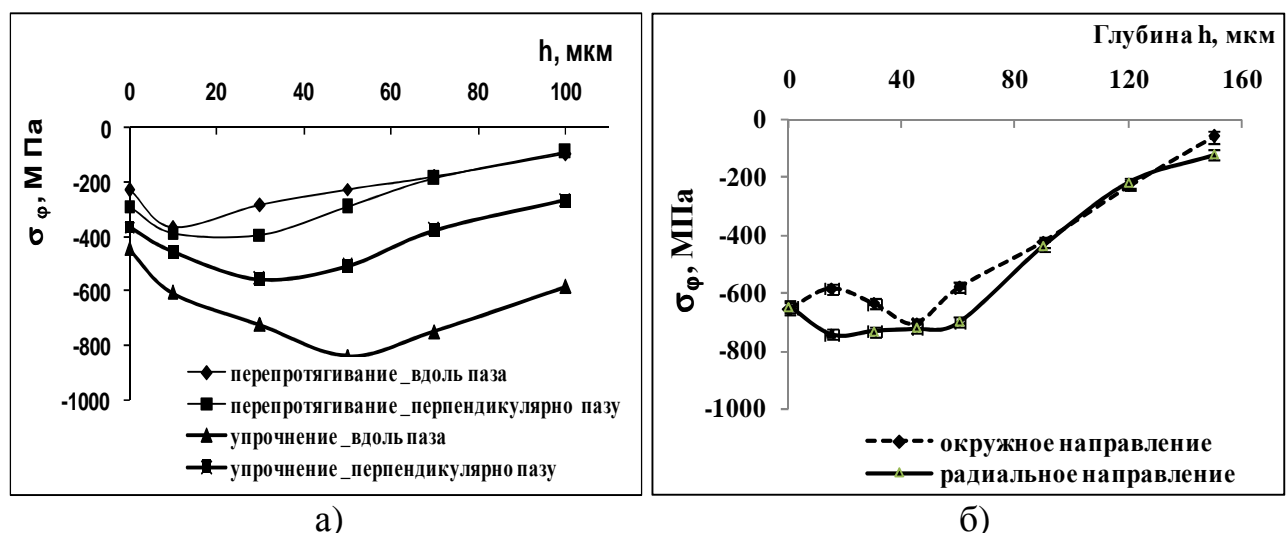


Рисунок 9 – Распределение ОН на образце №1 из ремонтного диска КНД по глубине после протягивания и упрочнения паза. а) на межпазовом выступе, б) на заднем торце обода.

На рисунке 10 представлены зависимости полуширины $B_{(110)}$ дифракционной линии (11.0) для фазы $\alpha-Ti$ и микротвердости H_v на заднем торце

обода диска КНД с различной наработкой в эксплуатации с правой стороны паза. Величину микротвердости H_v определяли на наклонном шлифе прибором ПМТ-3 (нагрузка 0,1 кг), величину полуширины $B_{(110)}$ определяли с помощью анализатора напряжений XSTRESS 3000 G3 при шаговом локальном удалении поверхностных слоев на приборе Movipol-3. Из рисунка видно, что характер изменения $B_{(110)}$ и H_v одинаковый. С увеличением наработки диска в эксплуатации происходит увеличение H_v и $B_{(110)}$. Определена корреляционная зависимость между величиной микротвердости H_v и полушириной $B_{(110)}$ ($H_v = 1,6 \cdot B_{(110)} + 295,0$), позволяющая проводить оценку микротвердости на поверхности торцев обода ремонтного диска КНД неразрушающим методом РСА.

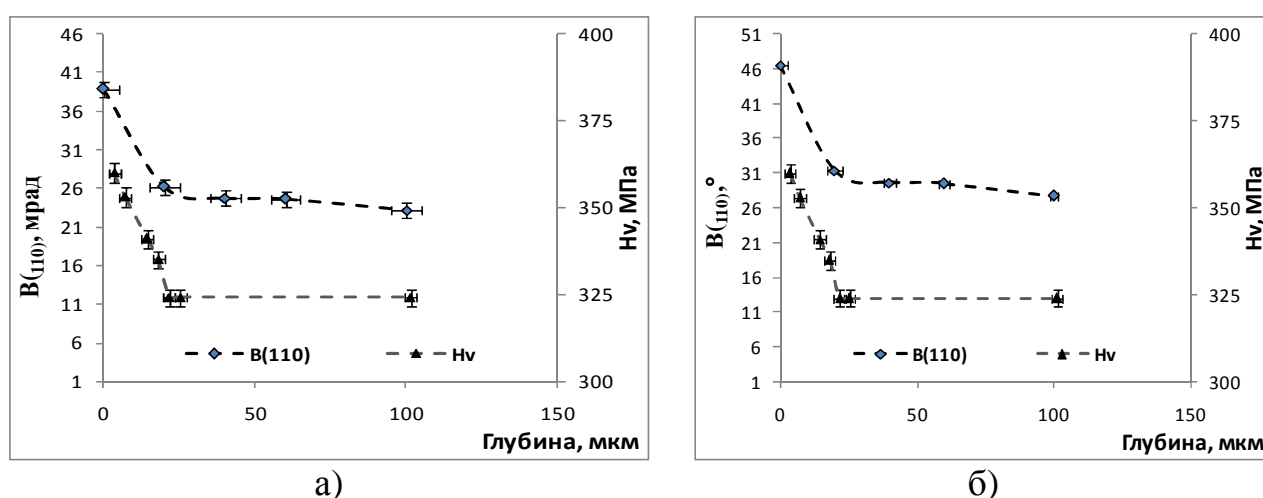


Рисунок 10 – Распределение полуширины $B_{(110)}$ и микротвердости H_v на заднем торце обода диска КНД с правой стороны паза. а) наработка 2000 ч (1600 ц), б) 4200 ч (2600 ц).

С увеличением наработки диска в эксплуатации величина ОН сжатия на задних торцах обода увеличивается, передних торцах обода уменьшается (рисунок 11). Определен критерий оценки «преддефектного» состояния диска по определению соотношения средних величин ОН в дисках КНД на заднем σ_3 и

переднем торцах обода σ_n с правой стороны паза
$$\overline{K_\sigma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{31} (\sigma_3 / \sigma_n).$$

Из рисунка 12 видно, на дисках 2 и 3 после ресурсных испытаний на установке УИР-3 ширина B_0 дифракционной линии (11.0) фазы $\alpha - Ti$ на диске 2 увеличивается, а на диске 3-уменьшается. Изменение B_0 на торцах обода диска 2 происходит равномерно по всем точкам измерения, а на диске 3 происходит в локальных областях. Максимальное увеличение полуширины B_0 дифракционной линии (11.0) определено на заднем торце обода диска 3 с правой стороны паза с номерами 1-5. Структурное состояние диска 3 после испытаний на установке УИР-3 относится к предельному случаю, до испытания на установке УИР-3 – к «преддефектному» состоянию.

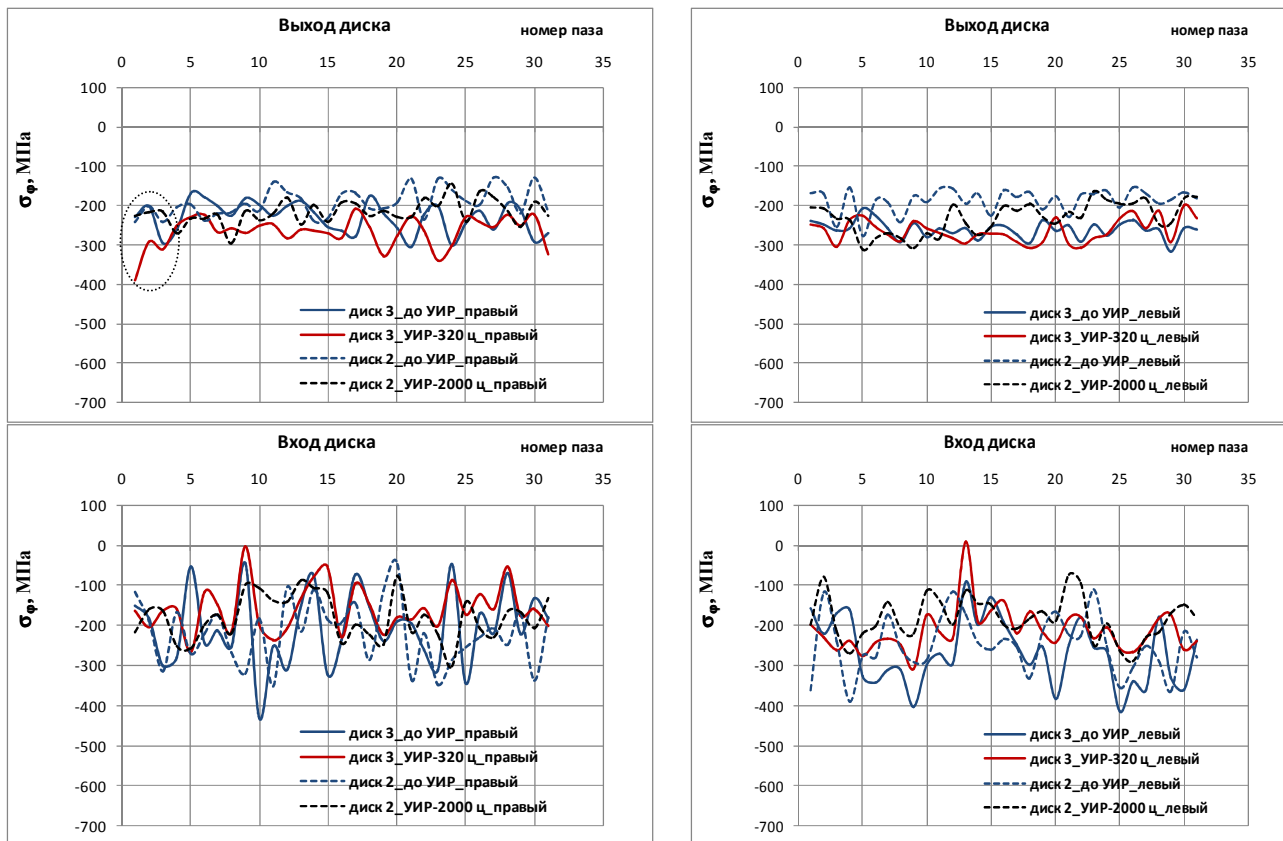


Рисунок 11 – Изменение ОН на заднем (выход) и переднем (вход) торцах обода дисков с правой и левой сторон паза до и после испытания на установке УИР (наработка дисков в эксплуатации (УИР) составляет: диск 2- 5300 циклов (2000 ц), диск 3 – 5800 циклов (320 ц)).

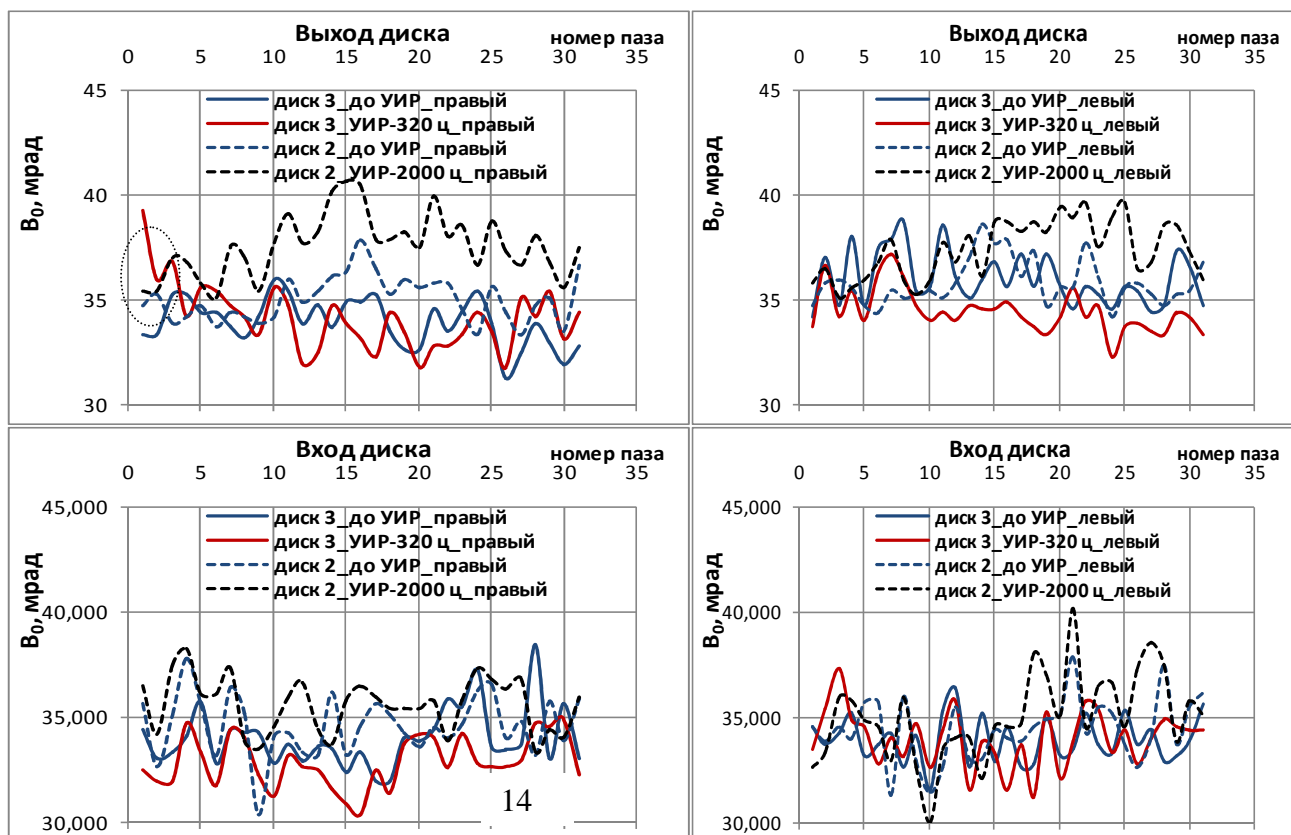


Рисунок 12 – Изменение полуширины B_0 дифракционной линии (11.0) фазы α -Ti при перпендикулярном падении рентгеновского луча ($\psi = 0^\circ$) на заднем и переднем торцах обода дисков КНД до и после УИР-3 с правой и левой сторон паза.

Параметр \bar{K}_σ на диске 2 (диске 3) до испытания на установке УИР составил 0,8 (1,3), после испытания на УИР – 1,2 (1,6).

На дисках КНД области максимальной нагруженности в эксплуатации (в опасных зонах концентраций напряжений), вид и уровень напряженного состояния известны. В зонах диска, где происходит разрушение в процессе испытаний присутствует текстура. Проведение экспериментальных измерений текстуры трудоемкий процесс и не всегда возможно провести точное исследование в этих зонах из-за сложного профиля и габаритов деталей.

Предлагается экспресс способ определения интегрированного влияния текстуры и пластической деформации на структурное состояние поверхности диска КНД. Определение интегрированных структурных параметров проводится следующими соотношениями:

$$BJ = \frac{\beta_{(11.0)K_{\lambda\alpha}}}{\beta_{(01.3)K_{\lambda\beta}}} * \frac{J_{(11.0)K_{\alpha}}}{J_{(01.3)K_{\beta}}}, \quad (8)$$

$$B = \frac{\beta_{(11.0)K_{\lambda\alpha}}}{\beta_{(01.3)K_{\lambda\beta}}}, \quad J = \frac{J_{(11.0)K_{\alpha}}}{J_{(01.3)K_{\beta}}},$$

где $\beta_{(11.0)K_{\lambda\alpha}}$ ($J_{(11.0)K_{\lambda\alpha}}$) и $\beta_{(01.3)K_{\lambda\beta}}$ ($J_{(01.3)K_{\lambda\beta}}$) – ширина (интегральная интенсивность - площадь профиля дифракционной линии без фона) дифракционной линии (11.0) при использовании излучения $Ti - K_{\alpha}$ и (01.3) при использовании излучения $Ti - K_{\beta}$ (рисунок 13).

В соотношении (8) вместо интегральной интенсивности J возможно использовать максимальную интенсивность дифракционной линии I_{max} . Использование предлагаемого способа определения интегрированных структурных параметров на диске КНД обеспечивает проведение экспресс анализа повреждаемости материала диска в процессе эксплуатации и ресурсных испытаний, определение остаточного ресурса ремонтных дисков неразрушающим способом и оптимизацию способов изготовления и обработки поверх-

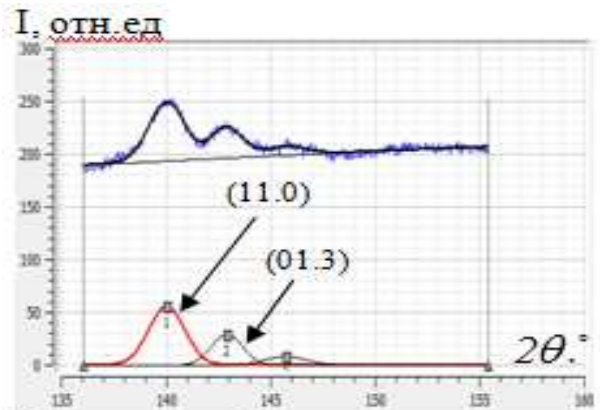


Рисунок 13 - Рентгенограмма на торце обода диска КНД

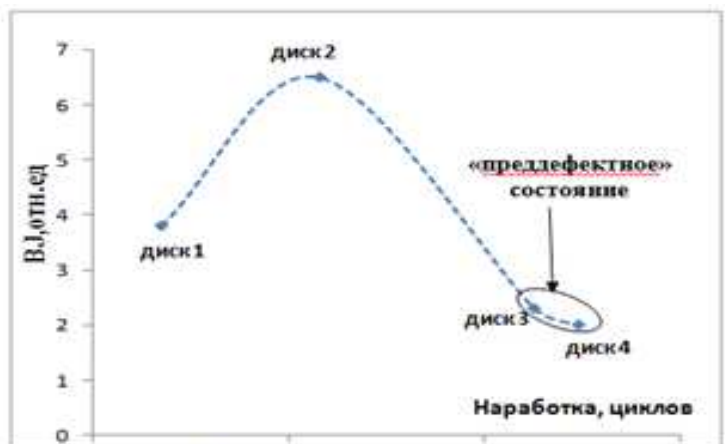


Рисунок 14 - Изменение параметра BJ на заднем торце обода диска КНД с правой стороны паза в зависимости от наработки.

ности дисков для повышения ресурса. Величина параметра $VJ < 2,5$, определенная на заднем торце обода диска характеризует «преддефектное» фактическое структурное состояние материала. Из рисунка 14 видно, что изменение параметра VJ в зависимости от наработки описывается нелинейной функцией. Выявлено, что скорость изменения параметра VJ в зависимости от наработки выше на дисках КНД с небольшим временем полета в цикле.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана комплексная методика анализа напряженного состояния деталей ГТД на основе систематизации рентгеноструктурных методов определения остаточных напряжений на деталях машиностроения.

2. Установлено, что в результате создания остаточных напряжений сжатия вдоль паза ремонтных дисков КНД из сплава ВТЗ-1 после обработки протягивания в диапазоне от -50 МПа до -220 МПа и дробеструйной обработки - в диапазоне от -300 МПа до -450 МПа повышен ресурс дисков в эксплуатации 2-2,5 раза; на лопатках из сплава ЖС6К после глубинного шлифования определены рациональные уровни остаточных напряжений $(-350 \div -550)$ МПа в продольном направлении глубинного шлифования и $(-500 \div -800)$ МПа – в поперечном направлении.

3. Установлены рациональные технологические параметры рентгеноъемки на лопатках и дисках ГТД: на лопатках из сплава ЖС6К после глубинного шлифования при использовании марганцевого излучения: $Mn - K_{\alpha}$, фаза Ni_3Al ; угол дифракции $2\theta_{(311)} = 152,5^{\circ}$; осцилляция $\Delta\psi = \pm 4^{\circ}$, осцилляция $\Delta\varphi = \pm 10^{\circ}$, рентгеновская постоянная упругости $E/(1+\nu) = 152$ ГПа; на лопатках из сплава ЖС6УВи с покрытием ВСДП11 на хромовом излучении: $Cr - K_{\alpha}$, фаза $NiAl$, $2\theta_{(211)} = 153^{\circ}$, $E/(1+\nu) = 91$ ГПа и на титановом излучении: $Ti - K_{\alpha}$, $2\theta_{(200)} = 144^{\circ}$, $E/(1+\nu) = 68$ ГПа; на лопатках и дисках компрессоров из сплава ВТЗ-1 на титановом излучении: $Ti - K_{\alpha}$, фаза $\alpha - Ti$; $2\theta_{(110)} = 139^{\circ}$; $\Delta\psi = \pm 4^{\circ}$; $E/(1+\nu) = 83$ ГПа.

4. Разработаны внешние эталоны для аттестации технологических процессов измерения ОН на деталях ГТД методом РСА. Подана заявка на полезную модель технологии изготовления эталонного образца меры напряжений.

5. Разработаны программы расчета компонентов тензора напряжений и структурных параметров, на основании которых предложен способ определения параметра напряжений K_{σ} и интегрированного структурного параметра VJ , позволяющих определить стадию "преддефектного" состояния материала ремонтного диска. Подана заявка на патент на способ оценки «преддефектного» состояния на дисках компрессоров.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

1. Трофимов В.В., Яблокова Н.А. Исследование остаточных напряжений в деталях ГТД сложной формы методом рентгеновской тензометрии. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование №1(117), 2011, СПб, С. 112-117. (Журнал из перечня изданий, рекомендованных ВАК по машиностроению).

2. Яблокова Н.А. Анализ напряженно-деформированного состояния лопаток ГТД методом рентгеноструктурного анализа и механическим методом. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование №1(117), 2011, СПб, С. 117-122. (Журнал из перечня изданий, рекомендованных ВАК по машиностроению).

3. Яблокова Н.А., Трофимов В.В. Остаточный ресурс ремонтных дисков компрессоров низкого давления. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование №4(135), 2011, СПб, С. 117-121. (Журнал из перечня изданий, рекомендованных ВАК по машиностроению).

4. Яблокова Н.А. Анализ остаточных напряжений на лопатках ГТД после глубинного шлифования. Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии. № 3, Издат-во «РГАТА», 2010, С.149-158.

5. Трофимов В.В., Яблокова Н.А. Определение рентгеновской постоянной упругости в покрытиях лопаток турбины ГТД. XXXIX неделя науки СПбГПУ. Матер. международной научно-практической конференции, 6.12.2010-11.12.2010, Часть 4, Механико-машиностроительный факультет. СПб, 2010, С.116-118.

6. Яблокова Н.А. Напряженное состояние в поверхностном слое покрытий лопаток турбины. Авиадвигатели XXI века [Электронный ресурс]: материалы конф., 30.11.2010-03.12.2010, Москва, ЦИАМ, 2010, С.114-117.

7. Яблокова Н.А., Трофимов В.В. Анализ напряженного состояния в поверхностных слоях лопаток ГТД. Фазовые превращения и прочность кристаллов: Сб. тезисов VI Международной конференции, 16.11.2010-19.11.2010, Черноголовка, 2010, С. 159-160.

8. Яблокова, Н.А., Журавель Е.В., Трофимов В.В. Напряженно-деформированное состояние дисков компрессора низкого давления газотурбинного двигателя. XL неделя науки СПбГПУ: матер. международной научно-практической конференции, 5.12.2011-10.12.2011, часть 4, Механико-машиностроительный факультет, СПб, 2011, 166-168.

9. Яблокова Н.А., Трофимов В.В. Влияние режимов термообработки на напряженное состояние и механические свойства стали 10X18H9БЛ. XL неделя науки СПбГПУ: матер. международной научно-практической конференции, 5.12.2011-10.12.2011, Часть 4, Механико-машиностроительный факультет. СПб, – 2011. - С. 174-176.