

ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС РЕМОНТНЫХ ДИСКОВ КОМПРЕССОРОВ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

В ремонтных дисках компрессоров низкого давления (КНД) опасно «преддефектное» состояние металла, когда на уровне структуры произошли необратимые изменения и повреждение из-за усталости может возникнуть внезапно. Существующие традиционные методы и средства неразрушающего контроля направлены, как известно, на поиск и нахождение конкретного дефекта, но уровень чувствительности этих методов не достаточен для выявления «преддефектного» состояния металла, что не позволяет проводить оценку (прогнозирование) остаточного ресурса.

Стадию «преддефектного» состояния материала дисков под действием циклических нагрузок характеризуют значительные пластические деформации, которые отображаются на поверхности в виде повреждений. Процессы упрочнения-разупрочнения материала поверхностного слоя приводят к размножению дефектов кристаллической структуры материала, дефекты смещаются к поверхности материала. Повреждения приповерхностного слоя двигаются на поверхность. Значительные повреждения материала сосредоточены в поверхностном слое глубиной 10–15 мкм. Поэтому наиболее оптимальными методами для неразрушающего анализа структурных параметров на поверхности считаются методы рентгеноструктурного анализа (РСА).

На основе анализа существующих подходов к оценке остаточного ресурса ремонтных дисков сделан вывод [1], что ресурс дисков КНД определяют зоны концентрации напряжений (ЗКН) — основные источники развития повреждений. На дисках КНД зонами концентрации напряжений в пазах типа «ласточкин хвост» являются расположенные на поверхности и под

поверхностью сопряжения основания и боковой грани паза (галтели) со стороны выхода потока воздуха [2].

В нашей работе для определения фактического состояния и оценки ресурса ремонтного диска КНД из сплава ВТ3-1 проводилась методами РСА одновременная оценка нескольких параметров материала диска, характеризующих: структуру металла (максимальная и интегральная интенсивность интерференционных линий; интегральная интенсивность фона; положение и профиль интерференционной линии), прочность материала (ширина интерференционной линии и интегральные параметры), экспресс-оценку количественного фазового состава сплава и напряженно-деформированного состояния (НДС).

Анализ данных, полученных нами экспериментально и известных по научно-технической литературе, показывает, что есть взаимосвязь между шириной интерференционных линий и микротвердостью, между шириной интерференционных линий и остаточной деформацией [3]. Анализ структурных изменений по полуширинам интегральной интенсивности, смещению и интенсивности интерференционных линий в титановых сплавах посвящен ряд работ [4–7]. В этих работах показано влияние параметров различных видов поверхностной обработки на микроискажения, плотность дислокаций и структурные превращения в титановых сплавах. Установлены связи между структурными, технологическими и ресурсными параметрами для сплава ВТ3-1 после обработки поверхности — упрочнением, электроимпульсной или термической.

Смещение линий на рентгенограмме свидетельствует об изменении периода кристаллической решетки исследуемого материала и связано с рядом особенностей структурного состояния материала. В первую очередь оно обусловлено закономерностями отражения рентгеновских лучей от атомных плоскостей в линейно-напряженном поликристаллическом материале. По смещению линий проводится анализ макронапряжений в металле [8]. Точность метода определения макронапряжений зависит от величины ориентированных микронапряжений и касательных напряжений, возникающих в металле при деформации. При наличии микронапряжений происходит уширение интерференционных линий и нарушается линейная зависимость межплоскостного расстояния d от $\sin^2 \psi$ (ψ — это угол между нормалью к поверхности образца и нормалью к отражающей плоскости). Расхождение зависимости $d(\sin^2 \psi)$ при углах наклона $\pm \psi$ показывает наличие касательных напряжений в поверхностном слое.

Интенсивность интерференционных линий зависит от ряда факторов и характеризует степень искажения кристаллической решетки. Ослабление интерференционных линий может происходить из-за динамических и статических искажений структуры [3]. Статические и связанные с ними напряжения возникают при наличии в кристаллах различного рода дефектов (дислокации, вакансии, дефекты упаковки и др.).

Целями нашей работы были разработка метода определения неразрушающими методами РСА структурных параметров на ремонтных

дисках КНД из сплава ВТ3-1 и определение остаточного ресурса ремонтных дисков по данным периодических исследований структурных параметров этих дисков и в соответствии с критериями предельного состояния в зонах концентраторов напряжений.

Определение структурных параметров

Методика разработана для проведения измерений и расчета структурных параметров в поликристаллических двухфазных авиационных титановых сплавах на дифрактометре XSTRESS 3000 G3 с использованием рентгеновской трубки с титановым анодом. Структурные параметры определяются методами РСА для схемы симметричной и несимметричной рентгено съемки, что позволяет проводить на деталях оценку интегрированных параметров структурного состояния по изменению напряженно-деформированного состояния, фазового состава, параметров тонкой кристаллической структуры и т. д.

Оборудование и принцип измерения. Для проведения анализа структурных параметров в титановых сплавах методом двух пиков (диапазон регистрации углов 2θ равен $106-160^\circ$) измерения на дифрактометре XSTRESS 3000 G3 выполняются для интерференционных линий (пики) фаз при поддержании дуги детектора в положении для нормального измерения напряжений, как показано на рис. 1, а (конфигурация $Y\bar{Y}$ модифицированного дифрактометра). При использовании метода четырех и более пиков необходимо использовать специальную дугу с диапазоном регистрации углов 2θ равен $65-160^\circ$; в этом слу-

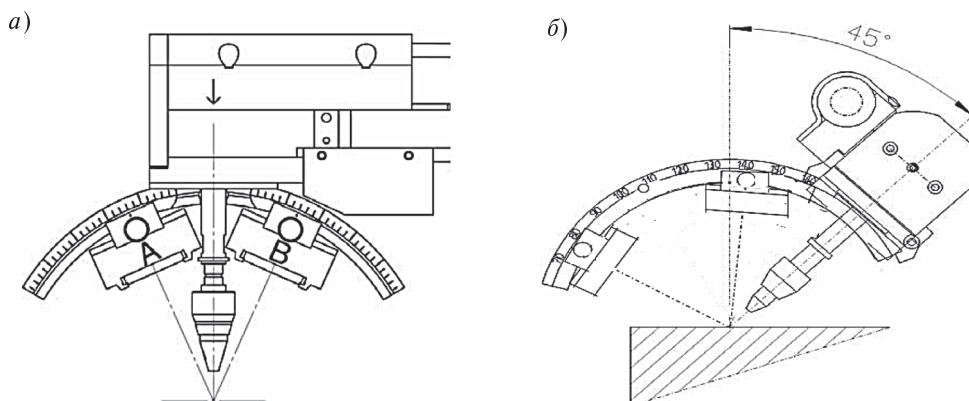


Рис. 1. Схемы проведения рентгено съемки для анализа структурных параметров в титановых сплавах с помощью дифрактометра XSRESS 3000 G3:
а — дуга детектора в стандартном режиме Ψ ; б — специальная дуга в режиме Ω

чае измерения проводятся для конфигурации дифрактометра Ω . В режиме Ω , когда начинается измерение, коллиматор касается точки измерения в перпендикулярном направлении, а затем осуществляется угловое смещение для измерения положения — в соответствии с показанным на рис. 1, б. Режим Ω позволяет проводить количественный фазовый анализ содержания фазы в двухфазных титановых сплавах. Оба режима рентгеносъемки позволяют определять структурные параметры методами РСА неразрушающим способом.

Калибровка дифрактометра проводилась при использовании порошка из титанового сплава с фазой кубической модификации α – Ti. Проверка объективности метода осуществляется при помощи эталонного образца с известным фазовым составом (3–6 % β – Ti, остальное α – Ti). Рентгенограммы от эталонных образцов и типичного образца из ремонтного диска КНД, полученные на дифрактометре XSTRESS 3000 G3R, приведены на рис. 2.

Расчет структурных параметров. Анализ структурных параметров методами РСА проводят для изучения влияния кристаллических дефектов по эффектам, которые они вызывают на рентгенограммах.

Методика предназначена для определения структурных параметров в титановых сплавах с фазовыми модификациями α – Ti и β – Ti. Вначале регистрируют рентгеновский спектр в заданном диапазоне углов, затем проводят подгонку нелинейной экспериментальной кривой (рентгеновский спектр) с применением алгоритма Левенберга—Марквардта (Levenberg—Marquardt) для

функции Пирсона VII и параболической функции вычитания фона.

Применение процедуры расчетного моделирования рентгенограмм с помощью метода подгонки пиков позволяет создать собственную структуру обработки экспериментальных данных по разным методикам независимо от используемого оборудования, автоматизировать расчет всех параметров и сохранить результаты в базе данных, провести автоматизированный выбор случайных выпадов измерения или провести оценку по установленным критериальным параметрам.

Пробоподготовка и эксперимент

Диски (образцы из диска) для исследования на дифрактометре XSTRESS 3000 G3R устанавливались на держателях образцов и крупногабаритных деталей. Подготовка образцов для проведения измерений на дифрактометре XSTRESS 3000 не требуется. Для проведения качественного фазового анализа, определения текстуры и микронапряжений на других современных дифрактометрах были изготовлены образцы из контрольных и дефектных ремонтных дисков КНД.

Измерения структурных параметров методами РСА на дисках проводилось на переднем и заднем торцах обода диска со стороны левого и правого радиуса паза. На каждом диске проведено 124 измерения. Операционное время измерения на каждом диске составляет 20 ч.

Анализ полученных результатов

Экспериментальные исследования изменения остаточных напряжений на торцах обода

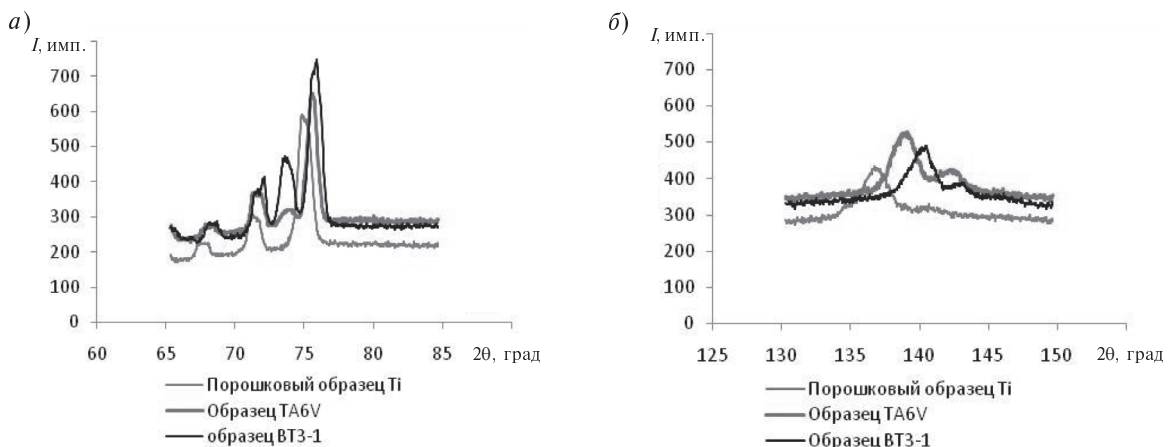


Рис. 2. Рентгенограммы эталонных образцов, полученные в режиме Ω :
 а — на детекторе А; б — на детекторе В

ремонтных дисков КНД со стороны правого радиуса паза показали, что на переднем торце обода диска происходит значительное изменение остаточных напряжений на всех исследуемых точках, а величина средней полуширины интерференционных линий (11.0) практически, не изменяется. Поэтому можно считать, что в пределах эффективной глубины проникновения рентгеновских лучей исследуемая зона диска испытывает упругие деформации. А на заднем торце обода ремонтных дисков с наработкой в эксплуатации 5300–5500 циклов (12000–15000 ч) при увеличении полуширины линии (11.0) происходит уменьшение величины макронапряжений сжатия по сравнению с диском, имеющим наработку в эксплуатации 500 ч. Также получено, что на переднем и заднем торцах диска максимальное перераспределение макронапряжений и изменение величины полуширины линии (11.0) фазы $\alpha - Ti$ происходит для дисков с наработкой в эксплуатации 12000–15000 ч (рис. 3, а). Есть четкая тенденция уменьшения полуширины линии (11.0) фазы $\alpha - Ti$ на передних торцах обода диска с увеличением наработки дисков в эксплуатации (рис. 3, б). На заднем торце обода (на выходе) диска, с правой стороны паза, характер изменения полуширины линии (11.0) в зависимости от наработки диска отличается от других исследуемых точек на торце обода. На дисках с наработкой 15000–20000 ч полуширина линий (11.0) на заднем торце обода практически не изменяется.

Рентгенографические данные показывают, что пластическая деформация металла, зависящая от плотности дислокаций и определяемая по ширине интерференционной линии, характерна

для первой стадии циклического деформирования. Вторая стадия обуславливается развитием нарушений сплошности (деструкция материала) и мало влияет на ширину интерференционной линии. Следовательно, исследуемые диски с наработкой в эксплуатации более 15000 часов можно отнести к зоне риска по причине деструкции материала в зонах концентрации опасных напряжений.

Анализ зависимости $d(\sin^2\varphi)$ показал, что на исследуемых образцах дисков с наработкой 12000–15000 ч в зонах риска образования дефекта нарушается линейность функции $d(\sin^2\varphi)$ и появляется значительное расхождение линий $d(\sin^2\varphi)$ для наклонов $\pm\psi$, что связано с действием микронапряжений и больших по величине касательных напряжений.

Величина касательных напряжений на диске с наработкой в эксплуатации 440 ч, определенная на заднем торце обода (на выходе диска), составила 5 % от величины нормальных напряжений; на дисках с наработкой 12000–20000 ч — 30 % от величины нормальных напряжений. В радиусе паза этого диска (в зоне начала образования дефекта) величина касательных напряжений составила 80 % от величины нормальных напряжений. Следовательно, образование микротрещины начинается в радиусе паза диска с дальнейшим распространением на задний торец диска.

Проведено исследование количественного фазового состава материала ремонтных дисков. Определение количественного фазового состава сплава выполнено для интерференционных линий фазы $\alpha - Ti$ (00.2, 1.01 и 11.0) и линий фазы

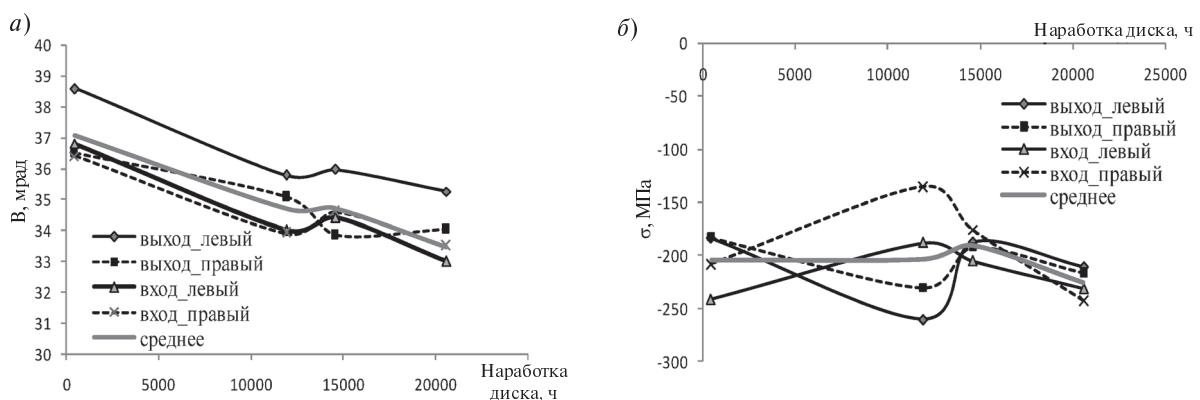


Рис. 3 Изменение остаточных напряжений σ (а) и полуширины интерференционной линии (11.0) B (б) в зависимости от наработки t



β -Ti (11.0) с помощью дифрактометра XSTRESS 3000 G3 на излучении Ti-K $_{\alpha}$. Содержание фазы β -Ti, определенное «по базису», составляет (22±3) %, а «по призме» — (15±3) %. Разница в количестве фазы β -Ti, определенной «по базису» и «по призме», вызвана исходной текстурованностью материала дисков.

При анализе изменения максимальной и интегральной интенсивности интерференционной линии (11.0) фазы α -Ti от наработки дисков обнаружено резкое изменение параметров для дисков с наработкой 15000–20000 ч. Анализ экспериментальных данных показал, что на исследованных дисках с наработкой менее 12000 ч значительные изменения структурных параметров происходят только в малых объемах, поэтому перераспределение этих параметров по всему ободу диска во время эксплуатации диска происходит без потери свойств материала. На дисках с наработкой более 12000 ч изменение структурных параметров охватывает большую часть обода диска. До точки перелома (см. рис. 3) судя по характеру изменения интенсивности и ширины интерференционных линий возможен дислокационный механизм развития пластической деформации. После точки перелома процесс деформации определяется развитием микроразрушений — деструкцией материала в тонком поверхностном слое, работает

дислокационный и вакансионный механизмы, что в дальнейшем может привести к образованию микротрещин на поверхности и их распространению в глубинные слои диска в процессе эксплуатации.

В настоящий момент на ОАО «НПО» Сатурн» продолжают работы по набору статистики рентгеноструктурных параметров на ремонтных дисках КНД, что позволит расширить базу экспериментальных данных, провести уточнение ресурса дисков и получить экспериментальные закономерности для оценки остаточного ресурса ремонтных дисков новых и серийных газотурбинных двигателей.

Разработана новая методика определения структурных параметров на крупногабаритных дисках КНД из сплава ВТ3-1 неразрушающими методами РСА с помощью дифрактометра XSTRESS 3000 G3.

Результаты анализа изменения рентгеноструктурных параметров на ремонтных дисках позволили определить закономерности изменения структурного состояния дисков в процессе эксплуатации и ресурсных испытаний.

Предложена возможная интерпретация механизма накопления повреждений в приповерхностных слоях дисков КНД в зависимости от наработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клюев, В.В. Подходы к построению систем оценки остаточного ресурса технических объектов [Текст] / В.В. Клюев // Диагностика и контроль.— 2007. № 3.— С. 18–23.
2. Кутырёв, В.В. Закономерности рассеяния и статистическая оценка границ распределения долговечности дисков КНД авиационных двигателей [Текст] / В.В. Кутырёв, С.В. Теплова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета.— 2009. № 3(19).— С. 376–380.
3. Рыбакова, Л.М. Структура и износостойкость металла [Текст] / Л.М. Рыбакова, Л.И. Кукуленова.— М.: Машиностроение, 1982.— 209 с.
4. Лоскутов, С.В. Влияние электроимпульсной обработки на структуру и долговечность титановых сплавов [Текст] / С.В. Лоскутов, В.В. Левитин // Журнал технической физики.— 2002. Т. 72. Вып. 4.— С. 133–135.
5. Папшева, Н.Д. Влияние ультразвуковых колебаний на тонкую кристаллическую структуру поверхностного слоя [Текст] / Н.Д. Папшева, М.К. Александров, О.М. Акушская // Известия Самарского научного центра Российской академии наук.— 2009. Т. 11. № 5(2).— С. 412–415.
6. Диваков, А.К. Откольная прочность титановых сплавов [Текст] / А.К. Диваков, Ю.И. Мешеряков, Н.И. Жигачева, Б.К. Барахтин, W.A. Cooch // Физическая мезомеханика.— 2009. № 12(6).— С. 42–52.
7. Skotnikova, M.A. Structural-Phase Transformation In Metal of Blades of Steam Turbines From Alloy ВТ6 After Technological Treatment [Текст] / M.A. Skotnikova, Y.M. Zubarev, T.A. Chizhik, I.N. Tsybulina // Proceeding of the «10th World Conference on Titanium». 2003. Hamburg, Germany.— 2004. Vol. 5.— P. 2991–2999.
8. Васильев, Д.М. Современное состояние рентгеновского способа измерения макронапряжений [Текст]: обзор / Д.М. Васильев, В.В. Трофимов // Заводская лаборатория.— 1984. Т. 50. № 7.— С. 20–29.