

период УР трещины МЦУ до любой заданной её длины (в границах УР), а измеримая характеристика обеспечивает микрофрактографическую реконструкцию УР. Её результаты можно использовать как для верификации расчётов УР, так и для получения экспериментальных оценок периода УР и периода до зарождения трещин МЦУ, а также для определения размеров трещин, не обнаруженных при проведённом ранее дефектоскопическом контроле (последнее необходимо для оценки выявляемости трещин применяемыми методами контроля).

Использование физических методов исследования (электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа) позволяет также проанализировать характерные дефекты, приводящие к зарождению трещин МЦУ в дисках АГТД, оценить их количество в критических зонах дисков, определить причину образования дефектов, их размеры, период до зарождения трещины МЦУ от дефекта и период её роста, влияние типа дефекта на конфигурацию развивающейся от него трещины. Результаты этих исследований используются при расчётном моделировании УР трещин МЦУ от дефектов различного типа.

Приведены примеры подтверждения

ресурса дисков АГТД гражданского и военного назначения с использованием физических методов исследования.

#### Библиографический список

1. Туманов Н.В., Черкасова С.А., Лаврентьева М.А., Воробьева Н.А. Исследование механизмов развития трещин малоциклового усталости в дисках авиадвигателей в условиях эксплуатации и оценка остаточной долговечности дисков // Вестник СГАУ. 2011. №3(27). Ч. 2. С. 175-184.
2. Туманов Н.В., Лаврентьева М.А. Концепция аддитивности циклической долговечности и её применение для определения ресурса дисков авиадвигателей // Вестник СГАУ. 2014. №5(47). Ч. 1. С. 11-19.
3. Туманов Н.В., Лаврентьева М.А., Черкасова С.А. Реконструкция и прогнозирование развития усталостных трещин в дисках авиадвигателей // Конверсия в машиностроении. 2005. №4-5. С. 98-106.
4. Туманов Н.В., Лаврентьева М.А., Черкасова С.А., Серветник А.Н. Моделирование устойчивого роста усталостных трещин в дисках турбины авиадвигателей при простых и сложных циклах нагружения // Вестник СГАУ. 2009. №3(19). Ч. 1. С. 188-199.

УДК 621.452-226:620.191

### КОМПЛЕКСНАЯ ФРАКТОДИАГНОСТИКА КОНИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС

©2016 Н.В. Туманов, Н.А. Воробьева, Д.В. Калинин, Е.В. Кожаринов, А.И. Калашникова

Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва

#### BEVEL GEAR WHEELS ALL-ROUND FAILURE ANALYSIS

Tumanov N.V., Vorobjeva N.A., Kalinin D.V., Kozharinov E.V., Kalashnikova A.I. (Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation)

*The work has been observed results for overall research of various bevel gear types concerning possible fatigue failure.*

Конические зубчатые колёса (ЗК) являются одними из наиболее нагруженных деталей авиационных газотурбинных двигателей (АГТД). Основное циклическое воздействие на ЗК – нагрузки от сил в зацеплении, вызывающие контактную усталость рабочих поверхностей зубьев, а также изгибную усталость зубьев и колеса в

целом. Контактная усталость приводит к образованию локальных выкрашиваний (питтингов) на рабочей поверхности зуба (рис.1а), изгибная усталость зуба – к обрыву зуба в результате развития усталостной трещины в его основании (рис.1б), изгибная усталость ЗК – к обрыву фрагмента ЗК вследствие распространения усталостной

трещины при резонансных колебаниях колеса (рис.1в).

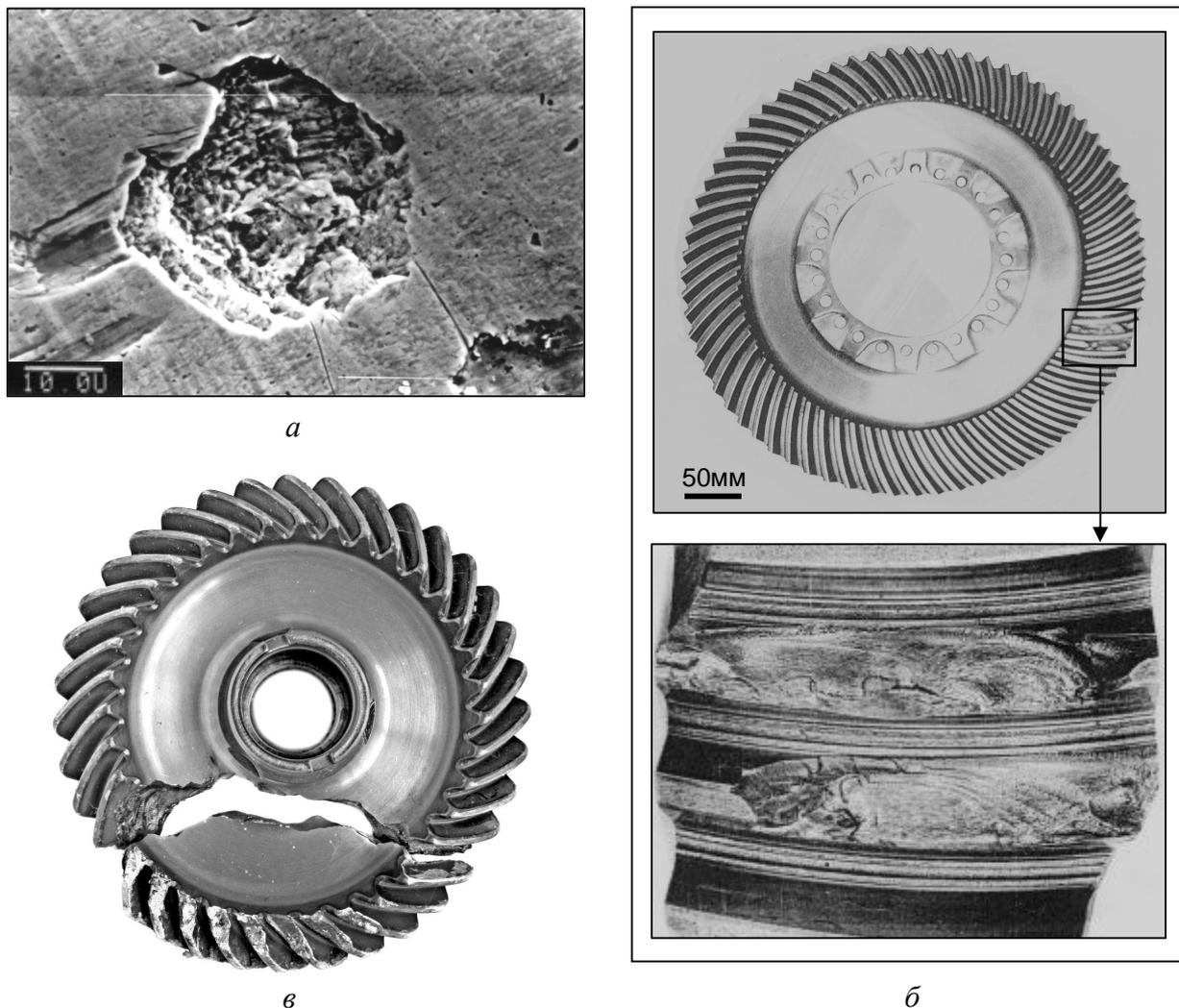


Рис.1. Типы усталостного разрушения конических зубчатых колёс: а – выкрашивание рабочей поверхности зуба, б – обрыв зуба, в – обрыв фрагмента зубчатого колеса

Конические ЗК подвержены значительным осевым нагрузкам в зацеплении, которые могут вызвать интенсивные изгибные колебания колеса на резонансных режимах.

Значения частоты воздействия при изгибной усталости зуба (при его повторно-статическом нагружении от сил в зацеплении) или при резонансных колебаниях колеса равны, соответственно,  $f_k$  или  $(\kappa z \pm m)f_k$ , где  $f_k$  – частота вращения колеса,  $z$  – число зубьев,  $m$  – число узловых диаметров при резонансных колебаниях ЗК,  $\kappa$  – номер возбуждающей гармоники. Поскольку для ЗК АГТД  $f_k \sim 10^2$  Гц, оба указанных воздействия приводят к многоцикловой усталости. Следовательно, только на основании анализа микрорельефа поверхности разрушения определить, какой тип циклического

воздействия вызвал усталостное разрушение, невозможно. Необходим комплексный подход, включающий наряду с фрактографическими исследованиями также анализ напряжённо-деформированного состояния при различных типах циклического воздействия на разных режимах работы двигателя и сопоставление местоположения расчетных критических зон и очагов разрушения ЗК. Кроме того, для определения причины снижения сопротивления усталости ЗК следует проводить комплексные металлографические исследования – определять микроструктуру различных участков зубчатого венца, исследовать микротвёрдость упроченного слоя, проводить микрорентгеноспектральный анализ дефектов в очагах разрушения.

В настоящей работе приведены

результаты фрактодиагностики (диагностики разрушения) конических зубчатых колёс 1) центрального привода авиадвигателя и 2) редуктора вертолётa.

Установлено, что обрыв фрагментов ЗК центрального привода авиадвигателя произошел вследствие развития усталостных трещин при интенсивных резонансных колебаниях колёс по форме с тремя узловыми диаметрами. Причиной, снизившей сопротивление усталости ЗК, явилась низкая поверхностная твёрдость межзубцовых впадин. На основании этих результатов разработаны мероприятия по уменьшению уровня резонансных вибронапряжений в ЗК (спроектировано, изготовлено и испытано демпфирующее устройство) и обеспечению необходимой поверхностной твёрдости межзубцовых впадин (в конструкторскую документацию включен контроль микро-твёрдости в межзубцовых впадинах по

установленному в процессе исследований критерию).

На основе микрофрактографической реконструкции кинетики разрушения зуба ЗК редуктора вертолётa установлено, что причиной разрушения явилась усталостная трещина, которая зародилась на рабочей поверхности зуба от абразивных царапин. Как показали данные микрорентгено-спектрального анализа, царапины образовались вследствие попадания между зубьями твёрдых инородных частиц (корунда и кварца).

Результаты работы свидетельствуют об эффективности комплексного междисциплинарного подхода к фрактодиагностике зубчатых колёс, позволяющего определять причины разрушения и растрескивания и разрабатывать мероприятия по их устранению.

УДК 621.454.2

## **МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ЗАЖИГАНИЯ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ГАЗООБРАЗНОМ ТОПЛИВЕ КИСЛОРОД И ВОДОРОД**

©2016 В.М. Зубанов, Д.В. Степанов, Л.С. Шаблий

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

### **TRANSIENT IGNITION PROCESSES SIMULATION OF THE ROCKET ENGINE OPERATING ON GASEOUS HYDROGEN AND OXYGEN**

Zubanov V.M., Stepanov D.V., Shabliy L.S. (Samara National Research University, Samara, Russian Federation)

*Has been described method to simulate the transient ignition processes in the rocket engine operating on gaseous hydrogen and oxygen. Have been considered features of the method and its relevance to tasks with transient ignition simulation. Has been given the description of used software tools. Has been described the chemical reaction system. Has been given the way of estimating the chemical reaction system from the physical process point of view.*

Процесс горения в камере любого ракетного двигателя (РД) является предметом пристального внимания исследователей-ракетчиков, поскольку он во многом определяет основные рабочие параметры двигателя. Расчётное предсказание характера и параметров процесса горения в камере РД позволяет выявить возможные ошибки проектирования ещё до воплощения изделия в металле, а также найти пути улучшения существующих двигателей с гораздо меньшими, по сравнению с экспериментальным изучением, затратами.

Процесс горения в химическом РД

принято рассматривать как совокупность 4-5 этапов [1]. В зависимости от вида топлива (однокомпонентное, двухкомпонентное, газобразное, жидкое, твёрдое) процессу непосредственно горения нередко предшествуют процессы распыла, газификации, смесеобразования. Данные внутрикамерные процессы сильно зависят от типа топлива и конструкции двигателя (например, полное или частичное испарение компонентов в газогенераторе). В открытой литературе существует некоторое количество специализированных методик расчёта этих процессов [2 - 5], а рассматривать универсальную