

УДК 621.9.011

А.М. СМЫСЛОВ¹, М.К. СМЫСЛОВА¹, А.И. ДУБИН²¹ Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия² ОАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение», Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ОБЪЁМНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЛОПАТКАХ КОМПРЕССОРА ГТД

Рассмотрены вопросы, связанные с исследованием релаксации остаточных объёмных напряжений в лопатках компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) из титанового сплава ВТ6. Проводится сравнительная оценка комплексной вакуумно-плазменной обработки (КВИПО) поверхности и серийной (базовой) технологией по параметрам релаксации объёмных остаточных напряжений. Исследуемые образцы вырезались из корневого сечения пера лопаток. Представлены результаты проведенных сравнительных исследований. Проводится анализ полученных данных. Показаны особенности распределения внутренних остаточных напряжений в варианте КВИПО

Ключевые слова: объёмные остаточные напряжения (ООН); технология; лопатка; ресурс; обработка.

Введение

При создании и производстве авиационных двигателей нового поколения необходимым условием является совершенствование существующих и разработка новых технологических процессов, направленных на повышение эксплуатационных характеристик деталей. Это всецело относится и к лопаткам компрессора, которые являются одними из наиболее массовых и ответственных деталей, работающих в условиях высоких знакопеременных нагрузок, температур, агрессивных сред и эрозии, определяя, в большинстве случаев, ресурс и надёжность газотурбинных двигателей (ГТД) [1,2].

Учитывая, что в условиях длительной эксплуатации разрушения, как правило, начинаются с поверхности, либо в тонком поверхностном слое, который формируется на окончательных этапах обработки, представляют особый интерес методы, связанные с соблюдением требуемых физико-химических свойств. Остаточные объёмные напряжения (ООН), наряду с остаточными поверхностными напряжениями (ОПН) оказывают значительное влияние на сопротивление усталости деталей, работающих в условиях статических и знакопеременных нагрузок. Традиционные отделочно-упрочняющие методы применительно к новым конструктивным исполнениям лопаток, как правило, исчерпали свои возможности.

Особый интерес представляет технология комплексной вакуумной ионно-плазменной обработки (КВИПО), включающей в себя ионную имплантацию (И.И.) и нанесение многослойных вакуумно-плазменных защитных эрозионноустойчивых покрытий.

Необходимость оценки остаточных напряжений в деталях сложных форм, в местах, которые являются концентраторами напряжений (кромки пера лопаток компрессора, радиусы перехода пера к полке замка), является особенно актуальной при эксплуатации ГТД с большим ресурсом, в том числе для прогнозирования его надёжности в дальнейшем.

Как известно [1], остаточные напряжения, возникающие в ходе технологического процесса обработки лопаток, а также при их эксплуатации в составе ГТД изменяются. При этом устойчивость напряжений резко снижается при эксплуатации лопаток в условиях циклического нагружения.

Это обусловлено, прежде всего, тем, что предел текучести при циклическом нагружении значительно ниже, чем при статическом. Кроме того, циклические нагрузки могут привести к заметному повышению температуры металла, интенсифицирующей процесс релаксации остаточных напряжений [1].

В данной работе на примере рабочих лопаток компрессора из сплава ВТ6 рассмотрены вопросы релаксации остаточных объёмных (внутренних) напряжений в результате пластической деформации металла, а также воздействия температуры (400...450°C).

1. Экспериментальная часть

1.1. Исследование остаточных объёмных напряжений в лопатках компрессора

Для сравнительной оценки релаксации остаточных напряжений, применялся безразмерный параметр – отношение напряжений:

$$S_{\sigma} = \frac{d\sigma_c}{d\sigma_t}, \quad (1)$$

где $d\sigma_c$ – изменение напряжения в лопатке, изготовленной по серийной технологии;

$d\sigma_t$ – изменение напряжения в лопатке, изготовленной по технологии с применением КВИПО поверхности.

Сравнительную оценку ООН проводили на вновь изготовленных лопатках без наработки ($\tau=0$), а также на лопатках с наработках, соизмеримых с назначенном ресурсом лопаток.

Известно [3, 4], что при КВИПО, с одной стороны, происходит повышение сопротивления усталости в результате ионного модифицирования, а с другой – возможно его снижение при последующем нанесении покрытия (увеличивающееся с ростом толщины покрытия). Результирующее влияние обработки на сопротивление усталости зависит от толщины покрытия и его внутренней структуры, а также от степени предшествующего упрочнения поверхностного слоя.

КВИПО образцов проводили на установке ННВ-6.6 с источником газовой плазмы с накалимым катодом ПИНК и аксиально-симметричными электродуговыми испарителями, при этом наносили многослойное защитное покрытие толщиной 12...16 мкм. Модифицирование поверхности выполняли ионами азота: низкоэнергетическое на установке ННВ-6.6 (энергия ионов $E = 0,9$ кэВ, доза $D = 2 \cdot 10^{19}$ ион/см²), высокоэнергетическое – на установке «Вита» ($E = 30$ кэВ, $D = 2 \cdot 10^{17}$ ион/см²).

В качестве объекта исследований выступали образцы лопаток 2 ступени компрессора низкого давления из титанового сплава ВТ6.

Внешний вид экспериментальных образцов лопаток представлен на рис. 1.

Объёмные остаточные напряжения определялись в месте появления усталостных трещин: в области сопряжения пера лопатки с замком со стороны спинки.

Усталостные трещины, исходя из проведённого анализа статистики разрушений при лабораторных исследованиях, были ориентированы, в подавляющем большинстве случаев, перпендикулярно продольной оси лопатки, поэтому определялись объёмные остаточные напряжения, действующие вдоль оси Z лопатки.

Методика определения объёмных остаточных напряжений основана на использовании способа полного освобождения, заключающегося в вырезке из детали образца и измерении с помощью тензорезисторов параметров деформаций, возникающих в результате вырезки [6].

Этапы разрезки включали в себя сначала вы-

резку плоского элемента, а затем - разрезку плоского элемента на «спинку» и «корыто».

В эксперименте были использованы тензорезисторы фольговые базой 3 мм; коэффициент тензочувствительности $S = 2,14$; номинальное сопротивление $R = 100$ Ом.

Препарирование производилось клеем на основе цианакрилата, для гидроизоляции на тензорезисторы наносили слой герметика кремнийорганического.

Измерения производили на приборе контроля деформаций, представляющем собой мост проводимости с автоматическим поразрядным уравниванием на специальном оборудовании с применением технологий виртуальных приборов LabView.

Установленные на лопатки тензорезисторы подсоединялись к измерительному прибору с помощью соединительной колодки с разъёмами и производился отсчёт начальных (нулевых) показаний прибора φ_0 для каждого тензорезистора.

Разрезку производили на электроэрозионном станке модели 4532Ф3 с проволочным электродом в керосиновой среде.

После первого этапа разрезки снимались показания φ_1 , после второго - φ_2 , а также величины номинального R_n и компенсационного R_k сопротивлений каждого тензорезистора.

На основании зависимостей [6], вычислялись объёмные остаточные напряжения.

Результаты обрабатывались математически и графически.



Рис. 1. Образцы для определения ООН в профильной части пера лопаток

2. Анализ полученных результатов

Области распределения объёмных остаточных напряжений иллюстрируются векторной диаграммой, представленной на рис.2:

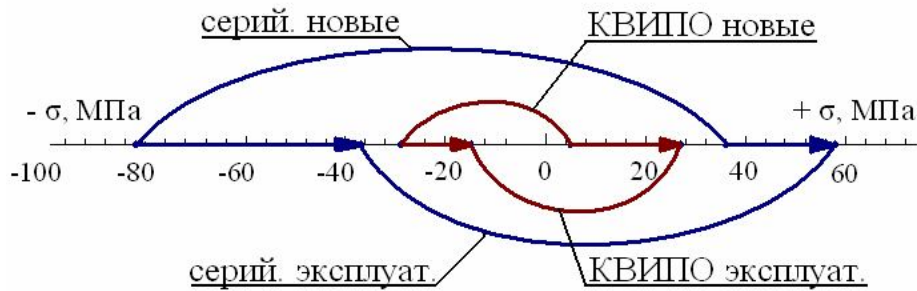


Рис. 2. Области распределения объёмных остаточных напряжений по серийной технологии и по КВИПО

Как следует из рис. 2 в исходном состоянии лопаток компрессора, обработанных по серийному варианту (финишная операция - виброшлифование) обнаружены максимальные напряжения в диапазоне $-82 \dots 36$ МПа, по варианту КВИПО $-29 \dots 5$ МПа. После эксплуатационной наработки на серийных лопатках диапазон напряжений составлял $-37 \dots 58$ МПа, по варианту КВИПО $-15 \dots 27$ МПа. Полученные результаты свидетельствуют, что для лопаток варианта КВИПО, имеющих эксплуатационную наработку и без эксплуатационной наработки характерно наличие таких объёмных остаточных напряжений растяжения и сжатия, уровень которых отличается от лопаток серийного варианта с преобладанием напряжений сжатия при меньшем уровне напряжений растяжения. Отношение максимальных напряжений сжатия образцов лопаток серийного варианта к КВИПО составляет 2,8 в исходном состоянии и 7,2 после эксплуатационной наработки. Отношение максимальных напряжений растяжения образцов лопаток серийного варианта к КВИПО составляет 2,5 в исходном состоянии и 2,2 после эксплуатационной наработки. Таким образом, с учётом [5] в варианте КВИПО формируется более стабильное по сравнению с серийной обработкой напряжённое состояние за счёт получения более равномерного структурно-фазового состава и повышенной стойкости поверхностного слоя, представляющего собой сочетание толстых и тонких слоёв покрытия.

Данные эксперимента показывают, что эксплуатационная наработка приводит к перераспределению остаточных объёмных напряжений в направлении напряжений растяжения под воздействием сочетания высоких температур и знакопеременных нагрузок.

Для варианта КВИПО после эксплуатационной наработки наблюдаются меньшая степень релаксации ООИ, что объясняется сформированным исходным более благоприятным напряжённым состоянием, а также большей сопротивляемостью слоёв покрытия действию эксплуатационных факторов.

Согласно данным, полученным ранее [5] полной релаксации ООИ после эксплуатации не проис-

ходит. Для образцов, изготовленных по серийной технологии при одинаковости упрочнения всей поверхности пера лопаток, эпюры ООИ имели подобную форму с наличием подслоного максимума, однако наблюдалось различие в величине напряжений.

На образцах, изготовленных по технологии с применением КВИПО как для исходного состояния, так после эксплуатационной наработки, наблюдается уровень максимальных ООИ сжатия, соответственно в 2,4 и в 1,9 раза больший, чем на образцах серийного варианта [5]. Приведённые результаты оценки выносливости, в том числе и после длительной наработки лопаток в составе полноразмерного изделия показали [5], что предел выносливости лопаток, обработанных по серийной технологии составляет 400 МПа, по технологии КВИПО – 440 МПа; после эксплуатации наблюдалось снижение пределов выносливости по обоим вариантам до, соответственно, 380 МПа и 420 МПа.

Длительная эксплуатация при наработках, измеримых с назначенным ресурсом лопаток приводит к релаксации свойств поверхности, связанных с процессами окисления, разупрочнения, изменения химического и структурно-фазового состава. Вместе с тем, согласно [5], у лопаток, обработанных по технологии КВИПО стабильность физико-химического состояния поверхностного слоя выше, что в конечном итоге обеспечивает более высокие значения их пределов выносливости и, как следствие, эксплуатационной надёжности.

Заключение

Таким образом, проведёнными исследованиями показано, что при воздействии эксплуатационных нагрузок и температуры на лопатки из титановых сплавов (на примере сплава ВТ6) происходит релаксация ООИ и снижение степени деформационного упрочнения. Нарботка приводит к перераспределению остаточных объёмных напряжений в направлении напряжений растяжения. При этом, степень релаксации ООИ лопаток серийного варианта, вы-

численная по (1), в среднем, больше, чем в лопатках с КВИПО в 1,9 раза.

Для повышения устойчивости к процессу релаксации напряжений и, как следствие, обеспечения эксплуатационной надёжности лопаток компрессора рекомендована технология КВИПО.

Положительное действие ионной имплантации в составе КВИПО заключается в блокировании процессов окисления и разупрочнения поверхности [3], что, в сравнении с базовыми технологиями упрочнения, выражается в меньшем снижении уровня выносливости. Все вышеперечисленные факторы способствуют большему ресурсу лопаток компрессора и их эксплуатационной надёжности.

Литература

1. Сулима, А.М. *Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин [Текст]* / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.

2. Петухов, А.Н. *Сопротивление усталости деталей ГТД [Текст]* / А.Н. Петухов. – М.: Машиностроение, 1993. – 240 с.

3. Смыслова, М.К. *Исследование и разработка комбинированных ионно-плазменных технологий, обеспечивающих повышение эксплуатационных свойств лопаток газовых и паровых турбин [Текст]* / М.К. Смыслова // Вестник УГАТУ. – 2004. – Т. 5, № 3(11). – С. 76-83.

4. Смыслов, А.М. *Технология и оборудование для упрочнения большегабаритных лопаток паровых турбин из титановых сплавов [Текст]* / А.М. Смыслов, Ю.М. Дыбленко, М.К. Смыслова // Вакуумные технологии и оборудование: материалы VI Международ. конф. – X., 2003. – С. 173–177.

5. Дубин, А.И. *О релаксационной стойкости лопаток компрессора [Текст]* / А.И. Дубин // Вестник двигателестроения. – 2011. – № 2. – С. 218-222.

6. ОСТ 1 00499-84. *Двигатели газотурбинные. Методика определения объёмных остаточных напряжений в деталях ГТД.*

Поступила в редакцию 29.05.2013, рассмотрена на редколлегии 14.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры технологии машиностроения В.С. Мухин, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ ОБ'ЄМНИХ НАПРУЖЕНЬ В ЛОПАТКАХ КОМПРЕСОРА ГТД

А.М. Смыслов, М.К. Смыслова, О.І. Дубін

Розглянуто питання, пов'язані з дослідженням релаксації залишкових об'ємних напружень в лопатках компресора газотурбінного двигуна (ГТД) з титанового сплаву VT6. Проводиться порівняльна оцінка комплексної вакуумно-плазмової обробки (КВИПО) поверхні і серійної (базової) технології за параметрами релаксації об'ємних залишкових напружень. Досліджувані зразки вирізалися з кореневого перерізу пера лопаток. Представлено результати проведених порівняльних досліджень. Проводиться аналіз отриманих даних. Показано особливості розподілу внутрішніх залишкових напружень у варіанті КВИПО.

Ключові слова: залишкові об'ємні напруження (ЗОН), технологія, лопатка, ресурс, обробка.

VOLUMETRIC STRESSES OF THE COMPRESSOR'S BLADES OF GTE INVESTIGATION

A.M. Smyslov, M.K. Smyslova, A.I. Dubin

The questions of relaxation volumetric residual stresses in the compressor's blades gas-turbine's engine (GTE) from titanium alloy VT6 investigation are considered. The complex vacuum-plasma treatment of the surface (CVPT) comparing with serial (base) technology by volumetric residual stresses relaxation is described. The specimens were cut from the root of the blade. Compare test results are shown. Analysis of data is given. Features of CVPT technology are shown.

Key words: volumetric residual stresses (VRS), technology, blade, resource, treatment.

Смыслов Анатолий Михайлович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологии машиностроения Уфимского государственного авиационного технического университета «УГАТУ», Уфа, Россия.

Смыслова Марина Константиновна – канд. техн. наук, доцент Уфимского государственного авиационного технического университета «УГАТУ», Уфа, Россия.

Дубин Алексей Иванович – начальник лаборатории Уфимского моторостроительного производственного объединения, Уфа, Россия, e-mail: alexey.dubin@ Rambler.ru.