

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОСТЭКСПЛУАТУЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЦ59Л И ДЖ59 И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИХ РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ

© 2006 Ю.П. Тарасенко, В.А. Сорокин, О.Б. Бердник, Л.А.Кривина

ЗАО НПЦ «Трибоника», Нф ИМАШ РАН, г. Нижний Новгород

При конструктивном совершенствовании газотурбинного двигателя возможно улучшение его служебных параметров – работоспособности и долговечности за счет увеличения (в 2...3 раза) общего ресурса турбинных лопаток, которое гарантируется стабилизацией и полной регенерацией, т.е. исправлением деградированной при длительной эксплуатации микроструктуры материала с помощью определенного цикла высокотемпературной восстановительной термообработки (ВВТО) лопаток. Представлены опыт и результаты восстановительной обработки.

Введение

Эксплуатация турбинных лопаток сопровождается термическим и силовым воздействием на них рабочего тела, которое может приводить к деградации структуры материала изделия, образованию в нем внутренних напряжений и, как следствие, к развитию поврежденности в виде микропор и микротрещин.

В процессе эксплуатации могут происходить достаточно глубокие структурные превращения и изменение напряженно-деформированного состояния в объеме лопаток, что изменяет кинетику микронеоднородностей. Именно образование неоднородностей является непосредственной причиной разрушения лопаток.

При конструктивном совершенствовании газотурбинного двигателя возможно улучшение его служебных параметров – работоспособности и долговечности за счет увеличения (в 2...3 раза) общего ресурса турбинных лопаток, которое гарантируется стабилизацией и полной регенерацией, т.е. исправлением деградированной при длительной эксплуатации микроструктуры материала с помощью определенного цикла высокотемпературной восстановительной термообработки (ВВТО) лопаток.

Объект и методика исследования

Исследованы комплекты лопаток 1 ступени ТВД двигателя ДЖ59 (усл.№52) и двигателя ДЦ59Л (усл.№53). Лопатки изготовлены из никелевого сплава марки ЧС70-ВИ методом точного литья в вакууме по выплавляемым моделям. Согласно ТУ 14-1-3658-83 сплав имеет оптимальный состав: 0,09% С; 15,9% Cr; 10,5% Со; 2,0% Мо; 5,3% W; 4,6% Ti; 2,8% Al; 0,2% Nb; 0,05% Y; Ni – основа.

На наружную поверхность пера и верхнюю часть полки лопаток (усл.№52) нанесено двухслойное жаростойкое покрытие системы Co-Cr-Al-Y (СДП-3А) толщиной ~120 мкм + ZrO₂ (КДП-1) – ~50 мкм.

Лопатки данного комплекта имеют наработку ~20000 часов.

С целью определения качественного состояния комплекта провели технический внешний осмотр лопаток с использованием оптического микроскопа МБС-9 с увеличением до 70 крат.

Микроструктуру основного металла и жаростойкого покрытия лопаток исследовали и фотографировали на оптическом микроскопе «Неофот 32» и растровом электронном микроскопе BS-300. Данные исследования проводили на поперечных шлифах, вырезанных и изготовленных из средней «горячей» части пера лопаток после их травления реактивом Марбле.

Результаты исследования

При техническом осмотре комплекта (усл.№52) обнаружено на поверхности перовой части лопаток наличие локальных сколов керамического слоя жаростойкого покрытия (рис.1).

Также выявлены следующие дефекты:

1. Трещины. Расположены в вершине пера лопатки (усл.№52) вдоль канала 3-го газывыводящего отверстия в перемычке δ_c со стороны спинки (рис. 1). Отбраковано (89%) лопаток. У лопаток (усл.№53) обнаружено на фронтальной поверхности замковой части всех лопаток наличие дефектов в виде поперечных полос контактного износа шириной ~10 мм и ~7 мм и глубиной ~до 2,0 мм, а также разрушение вершины и износа клино-

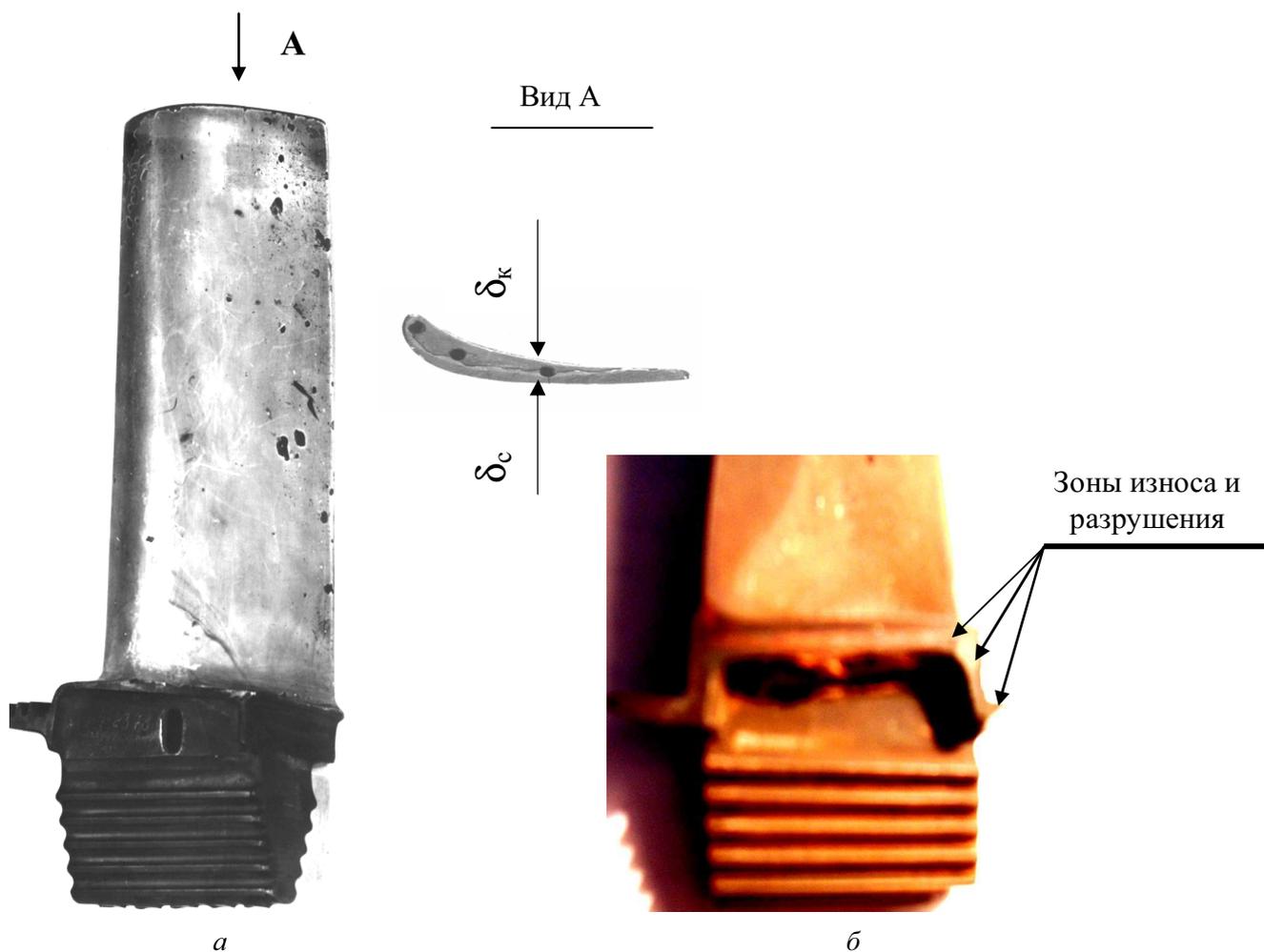


Рис.1. Результаты осмотра: а - внешний вид лопатки ТВД 1 ступени комплекта усл.№52, б - расположение и вид дефектов на лопатках ТВД 1 ступени комплекта усл.№53

вой полки лабиринтного уплотнения (рис.1б).

2. Раковины. Расположены в четырех лопатках (усл.№52) на спинке пера, в двух лопатках – на корыте, в одной лопатке – на полке. При макроанализе поверхности пера лопаток после механо-абразивного удаления керамического покрытия КДП-1 и электроимпульсной обработки установлено наличие множественных пор в металлическом покрытии типа СДП-3А. В основном металле лопаток указанных дефектов не наблюдается.

При микроскопическом исследовании дефектных зон в отбракованных лопатках, а также жаростойких покрытий данных деталей установлено:

- Главными фазами, присутствующими в микроструктуре металла лопаток, являются аустенит (γ -матрица сплава), γ' -фаза (основная выделяющаяся фаза $Ni_3(AlTi)$ и карбиды

типа $Me_{23}C_6$ на границах зерен и MeC , выделяющихся в виде крупных частиц (рис.4).

- Очаги зарождения трещин находятся в поверхностных слоях металла вершины пера в перемычке δ_c (рис.1а); их протяженность от торца пера достигает 6 мм; тип извилистый с зубчатыми берегами.
- Раковины представляют собой локальное скопление пор, глубина их залегания различна, в некоторых случаях они сквозные (рис.3б). Данные дефекты имеют металлургическое происхождение.
- Жаростойкое покрытие комбинированное и имеет два слоя (рис.2). Внутренний – состоит из твердого раствора элементов Cr , Al , Y в кобальте (светлая фаза) и интерметаллида $CoAl$ (темная фаза). «Подслой» толщиной $\sim 1,5$ мкм имеет состав сложнолегированного кобальта и карбидов. Наружный – представляет собой диоксид циркония ZrO_2 и включения чистого циркония (светлая фаза).

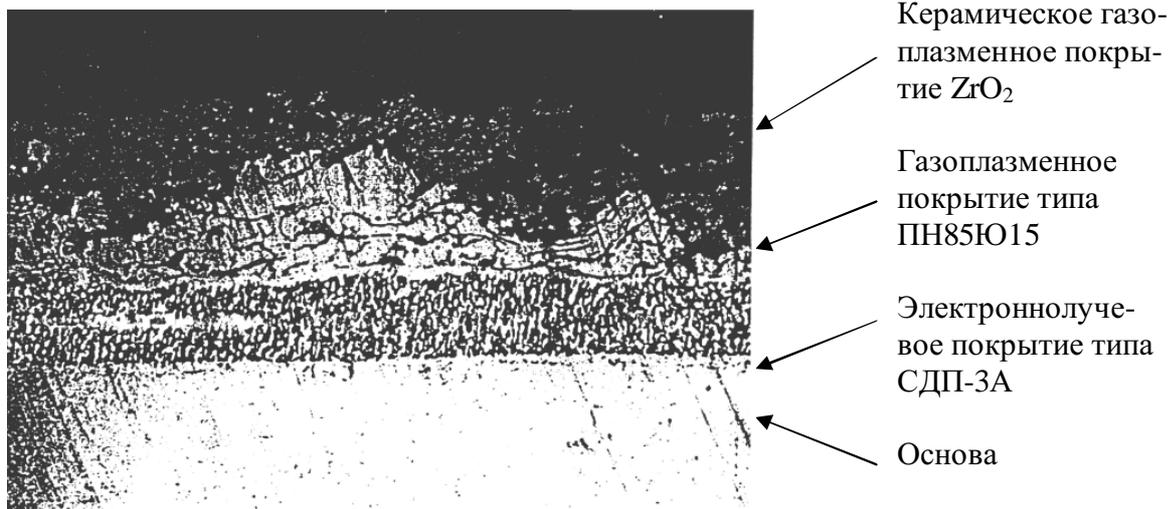


Рис.2. Микроструктура многослойного жаростойкого покрытия. $\times 200$

В (Co-Cr-Al-Y)-покрытии фиксируется наличие дефектов в виде открытых пор (рис.3а) и ножевых пустот, закрытых ZrO_2 -покрытием (рис.3б).

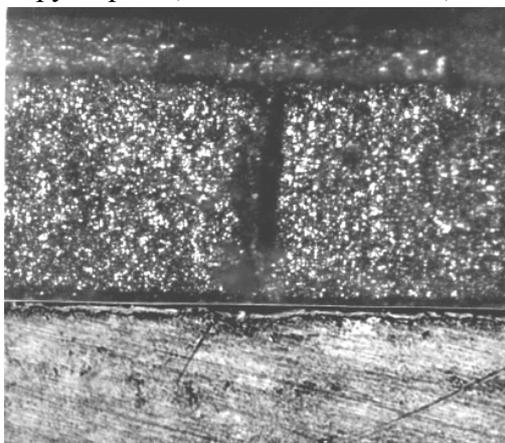
Микроскопический анализ на растровом электронном микроскопе BS-300 проводили при увеличении 10000 крат с целью исследования тонкой структуры материала лопаток. Лопатки усл.№52а и усл.№53а находились в исходном (постэксплуатационном) состоянии, а лопатки усл.№52б и усл.№53б – после проведения ремонтновосстановительной обработки.

Тонкая структура материала лопаток в постэксплуатационном состоянии деградирована, γ' -фаза подвержена коагуляции в процессе эксплуатации и неоднородна по размеру зерен (от 100 до 1000 нм). Объем-

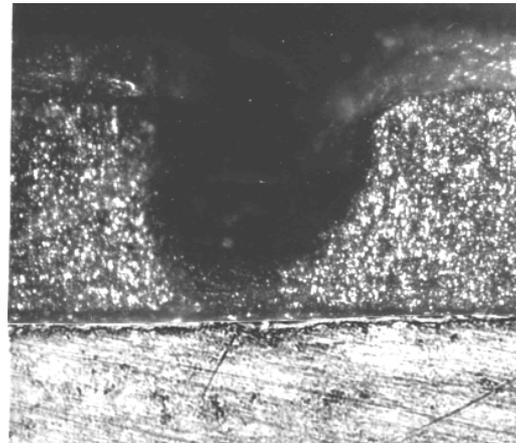
ное содержание γ' -фазы, рассчитанное методом А.А.Глаголева [3], составляет в данном материале $\sim 63\%$.

Тонкая структура сплава лопаток, прошедших после эксплуатации ВВТО по приведенному выше режиму, отличается высокой дисперсностью и однородностью (50...150) нм для образцов усл.№52а, (200...400) нм для образцов усл.№53а, кубической формой γ' -фазы. Объемное содержание γ' -фазы составляет в материале данной лопатки $\sim 67\%$.

Микроструктура зоны сплавления основного (ЧС70) и наплавочных (ВЗК, ЭП367) материалов лопатки усл. №53б плотная, сварочных микродефектов не имеет (рис.5).

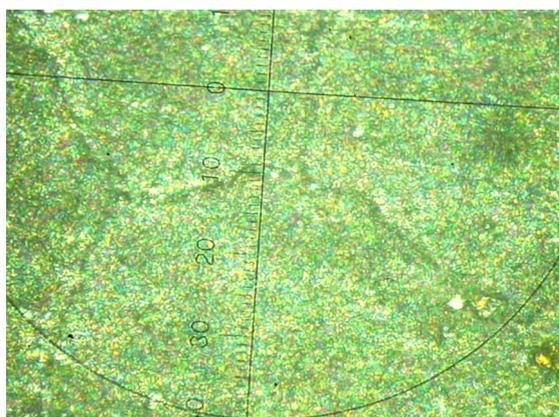


а

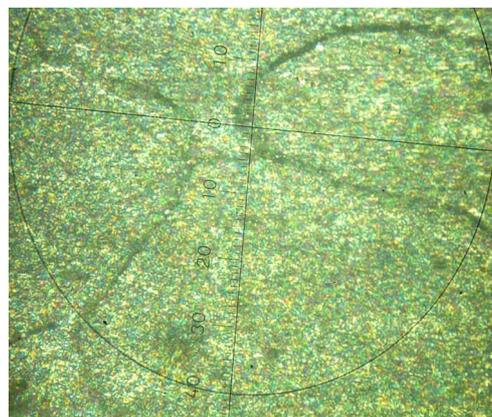


б

Рис.3. Вид микродефектов электронно-лучевого жаростойкого покрытия. $\times 250$: а - открытая пора; б - закрытая ножевая пора

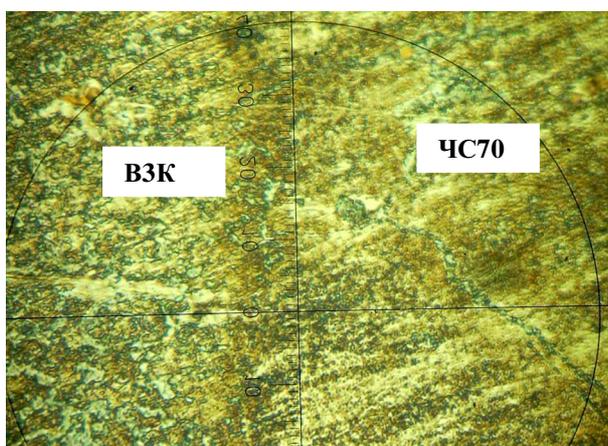


а

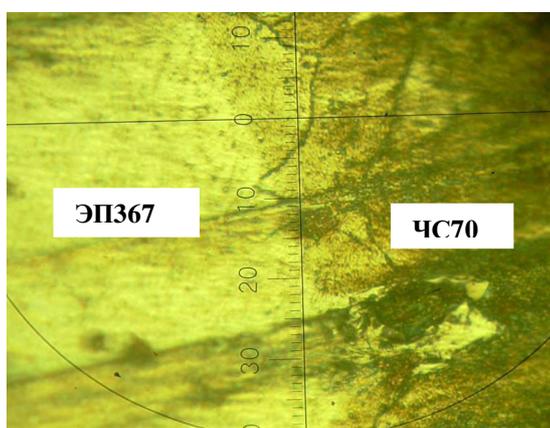


б

Рис.4. Микроструктура материала лопатки 1 ступени ТВД: а - в постэксплуатационном состоянии; б - после восстанавливающей высокотемпературной обработки. ×500



а



б

Рис. 5. Микроструктура материала лопаток усл.№53а и усл.№53б

Заключение

На основании результатов исследования лопаток 1 ступени ТВД двигателей ДЖ59 и ДЦ59Л можно констатировать, что данные лопатки по некоторым критериям непригодны для практического использования в эксплуатации, но ремонтнопригодны.

1. Трещины в вершине пера лопаток являются «главными» их дефектами, носят термический усталостный характер и связаны с циклическим изменением температуры по сечению пера при эксплуатации.

2. Наличие раковин металлургического характера является потенциальным источником возникновения более серьезных дефектов типа трещин, и могут быть причиной разрушения деталей.

3. Микропоры в системе жаростойкого покрытия служат основной причиной высокотемпературной газовой коррозии лопаток и их газо-эрозионного износа, а, следовательно, причиной уменьшения ресурса деталей.

4. Все лопатки данного комплекта ремонтнопригодны.

Определяющими технологическими операциями при ремонтновосстановительной обработке лопаток данного комплекта являются:

- Разделка трещин и других дефектов под заварку по общепринятым правилам;
- Сварочно-наплавочные работы для восстановления геометрических параметров замковой части лопаток. Конкретно, – заварку полос износа на хвостовике замка электродами из стеллита марки ВЗК и наплавку клиновой полки сварочной проволокой марки ЭП367.
- ВТО по режиму – закалка с температуры (1170...1190)°С, 4 часа, охлаждение – воздух;
- Удаление керамического покрытия (для комплекта ДЖ59, усл.№52) КДП-1 абразивно-пескоструйной обработкой;

- Механическая обработка мест заварки в соответствии с требованиями чертежа;
- Нанесение покрытия из ZrO_2 газоплазменным методом с предварительным нанесением связующего покрытия данным методом из материала типа ПН85Ю15 (рисунок б);
- Старение лопаток при температуре $(850 \pm 10)^\circ C$ в течение 16 часов, охлаждение - воздух;
- Окончательная механическая доработка комплекта лопаток. Сдача-приемка ОТК.

Лопатки исследуемых комплектов, не разрезанные и не разрушенные при выполнении научно-исследовательских работ, после проведения полного регламента ремонтно-восстановительной обработки были установлены на действующий газоперекачивающий агрегат. В настоящее время находятся в эксплуатации.

Список литературы

1. Поврежденность металлических материалов и способов ее устранения;

В.И. Куманин, М.В. Соколова, С.В. Лулева. Развитие поврежденности в металлических материалах; В.И. Куманин, Л.А. Ковалева, М.В. Соколова. Устранение поврежденности металлических материалов с помощью восстановительной термической обработки// *Металловедение и термическая обработка металлов*. №4. 1995, с.2; с.2-6; с.7-11.

2. Ч. Симс, В. Хагель. Жаропрочные сплавы/ Пер. с английского под ред. чл-корр. АН СССР Е.М. Савицкого. М.: *Металлургия*. 1976. 568 с.

3. Салтыков С.А. *Стереометрическая металлография*. М.:, 1978. 565 с.

ANALYTICAL ESTIMATION OF POSTOPERATIONAL CONDITION OF HIGH PRESSURE TURBINE BLADES OF ДЦ 59Л AND ДЖ59 ENGINES AND THEIR DAMAGE CONTROL FEATURES

© 2006 Y.P. Tarasenko, V.A. Sorokin, O.B. Berdник, L.A. Krivina

Scientific and Production Center "Tribonika", NN MERI of RAS

After the completion of HPT engine ДЦ59Л, ДЖ59 designed service life the set of blades has been analyzed in order to determine its maintainability. Mechanical properties, micro-and fine structure of blades in an initial conditions and after the recovery high-heat treatment have been identified. It is established that this set of blades is repairable, the recovery high-heat treatment improves mechanical properties of blades and stabilizes the structure of their alloy.