

УДК 669.245 : 544.6.018.45

В.А. ПОКЛАД, О.Г. ОСПЕННИКОВА, М.Р. ОРЛОВ*Федеральное государственное унитарное предприятие ММПП «САЛЮТ», Россия***ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЙ РЕМОНТ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ИЗ СПЛАВА ЖС32-ВИ**

Рассмотрены основные процессы деградации тонкой структуры монокристаллического жаропрочного сплава ЖС32-ВИ в составе рабочих лопаток турбины высокого давления авиационных газотурбинных двигателей, эрозии жаростойких защитных покрытий и окисления внутренних поверхностей охлаждаемых каналов. Исследованы и предложены способы восстановления тонкой структуры жаропрочного сплава, удаления продуктов высокотемпературного окисления внутренних поверхностей охлаждаемых каналов и проточной поверхности для последующего нанесения жаростойкого защитного покрытия.

монокристаллические рабочие лопатки турбины, жаропрочный сплав, защитное покрытие, эрозия, высокотемпературное окисление, «рафт»-структура, ползучесть, восстановительный ремонт

Введение

Повышение требований, предъявляемых к характеристикам авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) нового поколения, сопровождается увеличением температурно-силовых параметров работы деталей газового тракта при неизменном условии обеспечения их надежности. Решение проблемы повышения температурно-силовых условий эксплуатации рабочих лопаток турбины высокого давления (ТВД) связано с развитием технологии направленной кристаллизации в сочетании с разработкой новых жаропрочных сплавов и жаростойких покрытий.

Регламентирование скорости кристаллизации и скорости охлаждения лопаток в процессе термической обработки, пайки, нанесения и диффузионного отжига защитных покрытий, а также ограничение суммарной продолжительности высокотемпературных нагревов, определяют необходимое отклонение структуры и фазового состава жаропрочного сплава от равновесного состояния. Управление технологическими параметрами процессов кристаллизации и термической обработки позволяет сформировать оптимальную макро- и микроструктуру сплава в составе турбинных лопаток, обеспечивающую максимальный вклад эффектов упрочнения всех

структурных составляющих в достигаемый комплекс эксплуатационных характеристик. Однако, длительная эксплуатация рабочих лопаток турбины в условиях высоких температур и нагрузок сопровождается трансформацией тонкой структуры и развитием необратимых фазовых превращений в жаропрочном сплаве, приближая его фазовый состав к равновесной диаграмме состояния.

Развитие структурных и фазовых превращений в жаропрочном сплаве в сочетании с высокотемпературной ползучестью в процессе эксплуатации ГТД означает, что ресурс рабочих лопаток турбины имеет свой предел, обусловленный не только износом, имеющим внешние проявления, таким, как эрозия защитного покрытия, высокотемпературное окисление и коррозионное повреждение входной и выходной кромок пера, фреттинг-износ полок и зубьев хвостовика, но структурным состоянием сплава.

В этой связи актуальной является задача разработки технологии ремонта рабочих лопаток турбины высокого давления, лимитирующих ресурс ГТД.

1. Формулирование проблемы

Ремонтопригодность рабочих лопаток ТВД определяется величиной повреждения геометрии профильной части пера, эрозией и глубиной окисления

защитного жаростойкого покрытия, а также степень развития необратимых структурных изменений в материале лопаток.

Проблематичность восстановительного ремонта рабочих лопаток ТВД с равноосной структурой из жаропрочных сплавов ЖС6У-ВИ, или ЖС6К обусловлена зернограницной ползучестью сплавов в процессе эксплуатации и, соответственно, повреждением границ зерен, а также вероятностью оплавления границ зерен при восстановительной термообработке, температура которой должна быть выше температуры серийной гомогенизации на 10 – 15 °С.

Монокристаллическая структура рабочих лопаток ТВД позволяет более оптимистически рассматривать возможность их ремонта, однако, не исключает необходимости всестороннего изучения эксплуатационной повреждаемости жаропрочного сплава.

2. Анализ необратимых структурных изменений в монокристаллическом сплаве ЖС32-ВИ

В результате выполненных исследований установлено, что характерной особенностью охлаждаемых монокристаллических рабочих лопаток ТВД после длительной эксплуатации является сохранение исходной структуры жаропрочного сплава в стенках охлаждаемых каналов, включая спинку и корыто пера [1] (рис. 1, а). Необратимые структурные изменения в виде коагуляции упрочняющей γ' -фазы и формирования «рафт»-структуры наблюдаются только в наиболее горячих зонах – по входной и выходной кромкам пера (рис. 1, б). В процессе работы турбинных лопаток в условиях высокого уровня температур, упрочняющая γ' -фаза кроме частичного растворения, коагуляции и формирования «рафт»-структуры может также изменять свой химический состав в результате развития диффузионных процессов.

Исследование изменения химического состава упрочняющей γ' -фазы жаропрочного сплава ЖС32-ВИ после длительной эксплуатации рабочей лопат-

ки, выполненное методом энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа (РСМА), показало, что состав исходной γ' -фазы, сохранившейся в стенках охлаждаемых каналов, отличается от состава скоагулированной γ' -фазы в зоне входной кромки (табл. 1).

Повышение в процессе эксплуатационного нагрева содержания в γ' -фазе алюминия, тантала и ниобия, образующих алюминидную подрешетку в интерметаллиде Ni_3Al , свидетельствует о приближении ее состава к равновесному. Снижение содержания в γ' -фазе вольфрама, рения и хрома в общей сумме на 1,3 % означает повышение концентрации этих элементов в никелевой матрице в удвоенном количестве (исходя из соотношения 1:2 объемных долей, фаз γ и γ' в структуре сплава). Изменение химического состава никелевой матрицы в сторону повышения содержания в ней вольфрама, рения и хрома увеличивает вероятность выделения топологически плотноупакованных (ТПУ)-фаз в жаропрочном сплаве в процессе эксплуатации двигателя.

Длительная эксплуатация монокристаллических рабочих лопаток ТВД из сплава ЖС32-ВИ приводит к выделению μ -фазы в наиболее горячих зонах пера уже после 1000 часов работы (рис. 1, в). Пластины μ -фазы, имеющей по данным работы [2] ромбоэдрическую кристаллическую решетку, ориентированы по плоскостям наиболее плотной упаковки $\{111\}$ никелевой матрицы.

По результатам РСМА суммарное содержание рения и вольфрама в μ -фазе сплава ЖС32-ВИ достигает 50 % масс.

Причиной досрочного съема двигателя с эксплуатации может являться кратковременный заброс температуры газового потока, приводящий к перегреву рабочих лопаток ТВД.

Структурным признаком эксплуатационного перегрева является коагуляция упрочняющей γ' -фазы, ее частичное растворение и повторное выделение в виде сыпи (рис. 1, г).

Таблица 1

Химический состав упрочняющей γ' -фазы, % масс. в сплаве ЖС32-ВИ после длительной эксплуатации

Место анализа	Ni	Al	Ta	W	Re	Nb	Mo	Cr	Co
Стенка охлаждаемого канала	65,0	6,6	6,9	9,4	1,2	1,0	0,3	2,4	7,2
Входная кромка	64,8	7,4	7,2	9,2	0,8	1,5	0,6	1,7	6,8

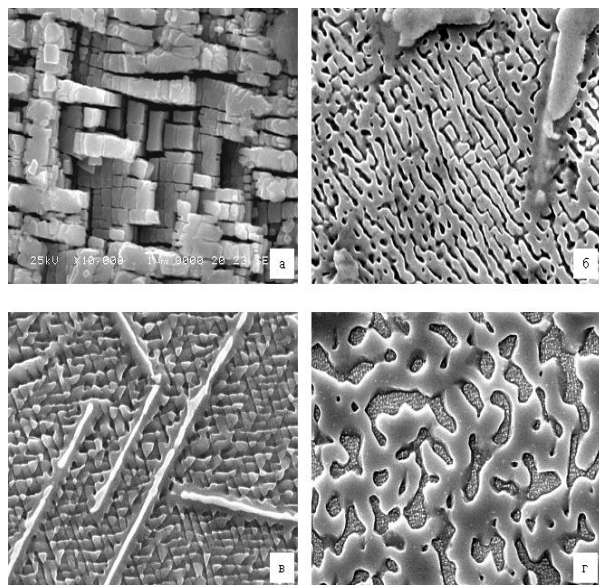


Рис. 1. Микроструктура монокристаллического жаропрочного сплава ЖС32-ВИ в составе рабочей лопатки ТВД:
а – кубическая морфология упрочняющей γ' -фазы после стандартной термической обработки, сохранившаяся в стенках охлаждаемых каналов, $\times 10000$;
б – формирование «рафт»-структуры и взаимодействие монокристаллов с металлической матрицей, $\times 7500$;
в – выделение μ -фазы в процессе длительной эксплуатации лопатки, $\times 10000$;
г – растворение, коагуляция упрочняющей γ' -фазы и повторное ее выделение в виде мелкой фракции в зоне входной кромки пера в результате эксплуатационного перегрева, $\times 7500$

Результаты выполненных исследований показывают, что несущий каркас рабочей лопатки ТВД, образованный стенками охлаждаемых каналов, не подвержен процессам ползучести при эксплуатации, а описанные выше признаки деградации структуры жаропрочного сплава ЖС32-ВИ присущи только наиболее горячим зонам пера. Это дает основание для разработки технологии восстановительного ре-

монта рабочих лопаток ТВД по схеме: газостатическое изотермическое прессование (ГИП) – восстановительная термическая обработка (ВТВО) – нанесение жаростойкого защитного покрытия.

Существенным препятствием выполнения операций ВТВО и нанесения защитных покрытий, в том числе и на внутренние поверхности охлаждаемых каналов, является окисление этих поверхностей в процессе эксплуатации двигателя.

Если проточная поверхность рабочей лопатки ТВД позволяет применить механические методы очистки поверхности под последующее нанесение защитного жаростойкого покрытия, то окисление внутренних поверхностей охлаждаемых каналов требует разработки специальных методов очистки.

3. Эксплуатационное повреждение внутренних поверхностей охлаждаемых каналов и способ их очистки от высокотемпературных окислов

Длительная наработка в эксплуатации монокристаллических лопаток приводит к эрозии защитного диффузионного покрытия на наружной поверхности лопаток со стороны входной и выходной кромок, а также к окислению внутренних поверхностей охлаждаемых каналов (рис. 2).

Ресурс монокристаллических рабочих лопаток ТВД из сплава ЖС32-ВИ ограничен по причине образования термоусталостных трещин, развивающихся от внутренних поверхностей охлаждаемых каналов в зонах действия максимальных градиентов температуры (рис. 2, в). Безусловно, период зарождения термоусталостных трещин определяется

уровнем температурно-силового нагружения лопатки и различен для лопаток разных двигателей и различных конструкций. Общим является то, что термоустойчивость сопровождается окислительным процессом жаропрочного сплава, как на поверхности охлаждаемого канала, так и в вершине растущей трещины. Очевидным является также и то, что защита внутренних поверхностей охлаждаемых каналов диффузионным жаростойким покрытием сдвигает во времени инкубационный период зарождения термоусталостных трещин.

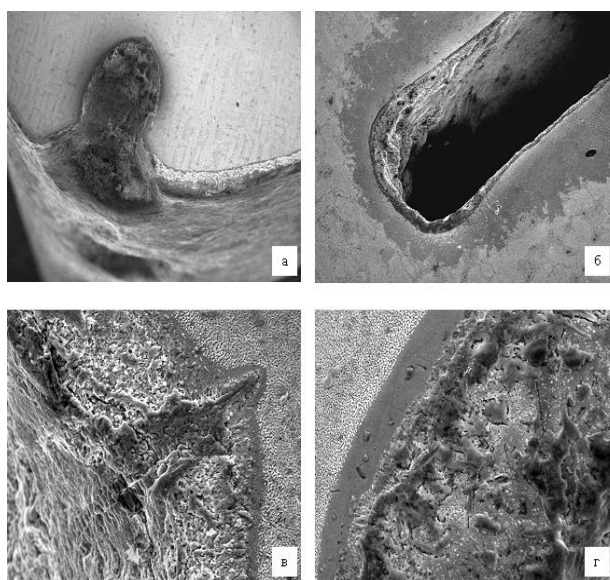


Рис. 2. Повреждение поверхностей монокристаллической рабочей лопатки ТВД из жаропрочного сплава ЖС32-ВИ в процессе длительной эксплуатации:
а – повреждение защитного покрытия и окисление металла лопатки в перфорационном отверстии, $\times 50$;
б – окисление внутренней поверхности охлаждаемого канала, $\times 150$;
в – развитие термоусталостной трещины в охлаждаемом канале, $\times 1000$;
г – фрагмент рис. 2, б, $\times 2000$

Окисление внутренних поверхностей охлаждаемых каналов нарушает условия теплообмена в лопатке, повышая температуру жаропрочного сплава и ускоряя процессы деградации его структуры.

Основной проблемой, возникающей при ремонте охлаждаемых рабочих лопаток ТВД, является очистка труднодоступных поверхностей каналов лопаток,

покрытых слоем продуктов высокотемпературного окисления жаропрочного сплава ЖС32-ВИ.

Высокая термодинамическая устойчивость окислов к кислотам и щелочам и их высокая твердость не позволяют применять традиционные методы химической, или гидроабразивной очистки поврежденных поверхностей для последующего восстановительного ремонта.

На основании результатов проведенных исследований различных вариантов очистки труднодоступных поверхностей охлаждаемых каналов рабочих лопаток ТВД от продуктов высокотемпературного окисления был использован принципиально новый подход, примененный для очистки секторов сопловых лопаток турбины из сплава ЖС6У-ВИ от продуктов сульфидной коррозии [3].

Сущность предложенного способа заключается в предварительном восстановлении продуктов высокотемпературного окисления жаропрочного сплава в процессе отжига лопаток в водородсодержащей атмосфере.

Температурные и временные параметры восстановительного отжига ремонтных лопаток ТВД определяются с одной стороны – термодинамической устойчивостью окислов металлов, входящих в состав жаропрочного сплава в атмосфере водорода, а с другой стороны – температурой солидус жаропрочного сплава (или припоя, которым была выполнена пайка заглушек на стадии изготовления лопаток).

В результате восстановительного отжига рабочих лопаток ТВД в водородсодержащей атмосфере, высокотемпературные окислы превращаются в полиметаллическую губку вследствие восстановления части переходных металлов, таких, как никель, кобальт и молибден [4]. Термодинамически более устойчивые окислы Al_2O_3 , Cr_2O_3 и TiO_2 присутствуют в составе полиметаллической губки в форме вкраплений.

Пористая структура восстановленной губки и полиметаллический гетерофазный состав предпопре-

деляют относительно легкое ее растворение в водных кислотных электролитах за счет протекания локальных электрохимических реакций между частями металлов, имеющих различную электроотрицательность (стандартный электродный потенциал). Разработанный метод очистки внутренних поверхностей охлаждаемых каналов позволяет полностью удалить продукты высокотемпературного окисления сплава, не повреждая основной металл (рис. 3).

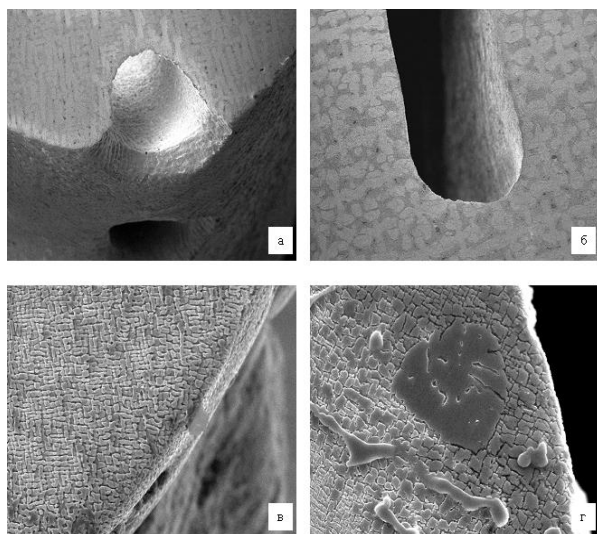


Рис. 3. Монокристаллическая рабочая лопатка ТВД, представленная на рис. 2 после очистки внутренних поверхностей охлаждаемых каналов:

- а – перфорационное отверстие, $\times 50$;
- б – охлаждаемый канал, $\times 100$;
- в – фрагмент рис. 3, а, $\times 3500$;
- г – фрагмент рис. 3, б, $\times 3500$

После подготовки трактовой и внутренних поверхностей охлаждаемых каналов рабочих лопаток ТВД, на них наносятся защитные диффузионные газоциркуляционные и конденсационные ионно-плазменные защитные жаростойкие покрытия.

Заключение

Предложен способ ремонта охлаждаемых монокристаллических рабочих лопаток ТВД из жаропрочного сплава ЖС32-ВИ, включающий предварительную очистку внутренних поверхностей охлаждаемых каналов от продуктов высокотемпературного окисления с помощью восстановительного отжига в водородсодержащей атмосфере и последующего травления в водном растворе кислот, операции ГИП, ВТВО и нанесения защитных жаростойких покрытий на проточные и внутренние поверхности пера.

Литература

1. Орлов М.Р. Структура направленно закристаллизованных жаропрочных сплавов и работоспособность лопаток турбины высокого давления // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2002. – № 1. – С. 70 – 74.
2. Simonetti M., Caron P. – Role and behaviour of μ phase during deformation of nickel-based single-crystal superalloy. // Materials Science and Engineering A254. – 1998. – P. 1 – 12.
3. Орлов М.Р. Патент України № 46104. Засіб очищення деталей з жароміцних сплавів.
4. Самсонов Г.В., Борисова А.Л., Жидкова Т.Г. и др. Физико-химические свойства окислов. – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.

Поступила в редакцию 1.06.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.С. Елисеев, Федеральное государственное унитарное предприятие ММП «САЛЮТ», Москва.