

УДК 669.245

В.А. ПОКЛАД¹, О.Г. ОСПЕННИКОВА¹, М.Р. ОРЛОВ¹, М.А. СУДИНИН²¹Федеральное государственное унитарное предприятие ММПП «САЛЮТ», Россия²ООО «АВДТ», Россия

ТЕХНОЛОГИЯ УДАЛЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ ИЗ ОХЛАЖДАЕМЫХ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рассмотрены основные технологические схемы процесса удаления керамических стержней из пустотелых лопаток газотурбинных двигателей методом автоклавного выщелачивания. Выполнен анализ повреждений внутренних полостей лопаток в процессе удаления керамики. Исследовано влияние технологических параметров процесса удаления керамики на растрав фазовых составляющих жаропрочных сплавов ЖС6У-ВИ, ЖС26-ВИ и ЖС32-ВИ, а также на развитие в отливках монокристаллических лопаток хрупких водородных трещин. Опробована оптимальная технологическая схема выщелачивания корундовых стержней с применением циклического перехода щелочного раствора пар – конденсат в защитной атмосфере инертного газа.

автоклавы высокого давления, охлаждаемые лопатки турбины, жаропрочные никелевые сплавы, упрочняющая γ' -фаза, эвтектические карбиды, водородная хрупкость, выщелачивание стержней

Введение

Анализ эксплуатационных термоусталостных трещин в охлаждаемых рабочих лопатках турбины высокого давления (ТВД) из сплава ЖС6У-ВИ с равноосной структурой [1] и из сплава ЖС32-ВИ с монокристаллической структурой [2] позволяет однозначно утверждать о преимущественном развитии термоусталостного разрушения от внутренней поверхности охлаждаемых каналов в зоне действия максимальных температурных градиентов. По данным фрактографических исследований изломов охлаждаемых рабочих лопаток ТВД после усталостных испытаний, основная доля очагов разрушения также расположена на внутренней поверхности охлаждаемых каналов.

Расположение очагов разрушения лопаток на внутренних поверхностях охлаждаемых каналов обусловлено шероховатостью поверхности каналов. В этой связи определяющее значение в обеспечении качества внутренних поверхностей каналов имеет технология удаления керамических стержней из отливок лопаток.

Одним из способов удаления керамических стержней из отливок турбинных лопаток является

растворение керамики в расплаве бифторида калия. Технологический процесс удаления керамики в бифториде калия сопровождается травлением металлической матрицы никелевых сплавов, а в сплаве ЖС32-ВИ – растравом межосных зон дендритов.

В производстве охлаждаемых рабочих лопаток турбины более широкое применение находит метод выщелачивания керамических стержней в автоклавах. Автоклавное удаление керамических стержней из отливок пустотелых лопаток в водном растворе щелочей при определенном сочетании технологических параметров сопровождающееся выщелачиванием эвтектических карбидов, травлением упрочняющей γ' -фазы и осаждением на поверхности лопаток пористого слоя никеля [3].

Серьезной проблемой автоклавного выщелачивания стержней является выделение водорода при взаимодействии со щелочью субокислов алюминия, входящих в состав керамики, а также в результате гидратации алюминия, титана и железа, входящих в состав жаропрочных сплавов и деталей автоклавов. Выделение водорода в процессе выщелачивания стержней приводит к развитию хрупких водородных трещин в отливках турбинных лопаток [4].

Формулирование проблемы. Проблема повышения работоспособности пустотелых турбинных лопаток требует детального рассмотрения механизмов повреждаемости жаропрочных никелевых сплавов при применении различных технологических схем удаления керамических стержней и оптимизации параметров процесса удаления керамики с целью обеспечения необходимого качества внутренних поверхностей охлаждаемых каналов.

Решение проблемы. Исследование повреждаемости жаропрочных сплавов при удалении керамических стержней

Анализ взаимодействия жаропрочных сплавов с бифторидом калия. Исследование состояния поверхности жаропрочных сплавов после операции удаления керамических стержней на основе электрокорунда в расплаве бифторида калия выполнили методом растровой электронной микроскопии на монокристаллических рабочих лопатках ТВД из сплавов ЖС26-ВИ и ЖС32-ВИ, а также на предварительно приготовленных металлографических шлифах жаропрочных сплавов ЖС6У-ВИ, ЖС26-ВИ и ЖС32-ВИ.

Анализ поверхности рабочих лопаток позволил установить, что в результате травления в бифториде калия металлической матрицы жаропрочных сплавов, происходит растрав литейной усадочной пористости (рис. 1, а).

Наиболее чувствительным к травлению в бифториде калия является жаропрочный сплав ЖС32-ВИ, в котором происходит глубокое травление межосных зон дендритов (рис. 1, б).

Глубина рельефа, образующегося при травлении металлической матрицы сплава, ЖС32-ВИ достигает 40 мкм.

Интенсивное травление упрочняющей γ' -фазы сопровождается формированием ячеистой морфологии поверхности. Значительно меньшее повреждение поверхности лопаток и образцов при удале-

нии керамических стержней из лопаток в бифториде калия наблюдается в жаропрочных сплавах ЖС26-ВИ и ЖС6У-ВИ. Глубина травления никелевой матрицы достигает 20 мкм, при этом над поверхностью остаются остовы эвтектических карбидов (рис. 1, в, г).

Исследование дефектов, образующихся в турбинных лопатках при автоклавном выщелачивании керамических стержней. Применение автоклавов позволяет повысить температуру водных растворов щелочей на основе NaOH, KOH, или их смеси, до температуры выше точки кипения при атмосферном давлении.

Повышение температуры щелочного раствора до 250 – 400 °С позволяет удалять керамические стержни на основе корунда из пустотелых монокристаллических лопаток в результате химического взаимодействия корунда со щелочами с образованием алюминатов натрия и калия.

В настоящее время широкое применение получили вращающиеся автоклавы закрытого типа. Особенностью таких автоклавов, применяемых в условиях производства ОАО «МОТО СИЧ» [5], и их аналога в условиях ЗМКБ «ПРОГРЕСС» [6], является герметичная упаковка лопаток с щелочным раствором посредством крышки и наличие в рабочем пространстве автоклава воздуха (до 20% объема). Давление в автоклавах закрытого типа достигается в результате печного нагрева закрытого объема с лопатками и щелочным раствором.

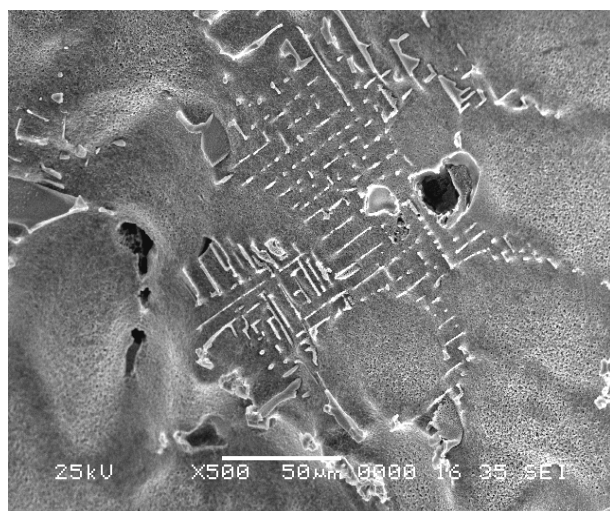
Использование вращающихся герметичных автоклавов не позволяет управлять агрегатным состоянием щелочного раствора, что существенно снижает эффективность технологического процесса выщелачивания корундовой керамики и приводит к повреждению недоступной внутренней поверхности охлаждаемых каналов.

Одним из дефектов, образующихся в процессе автоклавного удаления стержней по технологи-

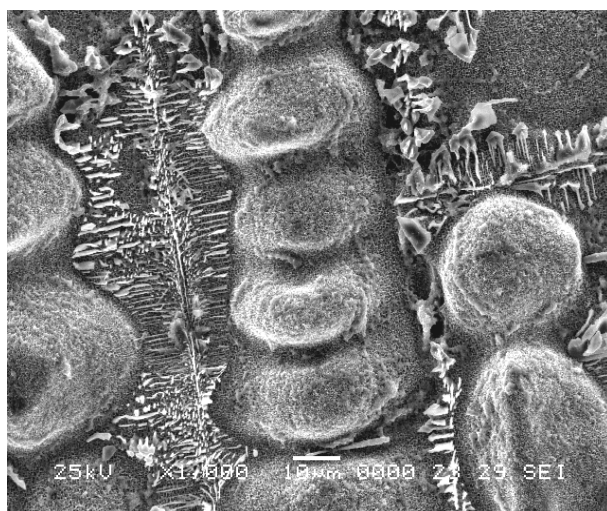
ским схемам [5, 6] является выщелачивание карбидов на поверхности лопаток (рис. 2, а, б). Глубина дефектов может достигать 50 мкм.

Присутствие в автоклавах закрытого типа воздуха способствует анодному окислению упрочняющей γ' -фазы с образованием окислов алюминия и чистого

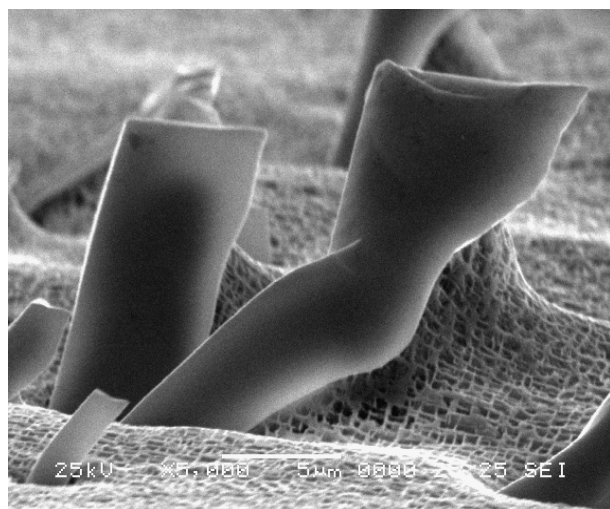
никеля. В лаборатории атомной энергетики компании GENERAL ELECTRIC был установлен механизм образования чистого никеля при коррозионном повреждении жаропрочного сплава при температуре до 500 °C [7]:



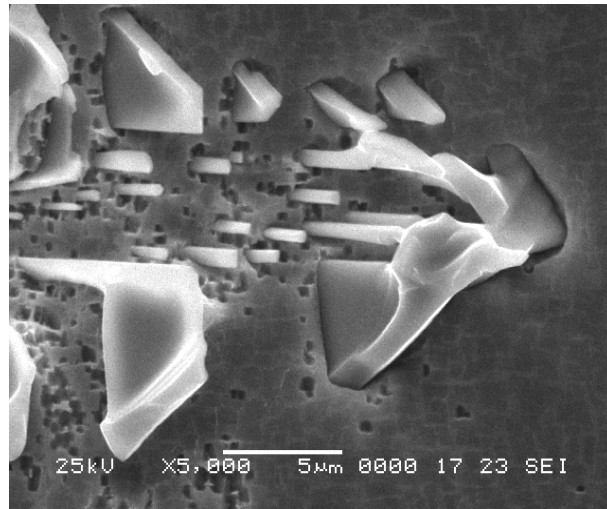
а



б



в



г

Рис. 1. Травление металлической матрицы жаропрочных сплавов в бифториде калия при удалении керамических стержней:

- а – растрав литейной усадочной пористости на внутренней поверхности охлаждаемого канала монокристаллической рабочей лопатки ТВД из сплава ЖС32-ВИ, x500;
- б – растрав металлической матрицы в межосных зонах дендритов монокристаллического жаропрочного сплава ЖС32-ВИ, x1000;
- в – травление металлической матрицы в монокристаллическом жаропрочном сплаве ЖС26-ВИ, x5000;
- г – травление металлической матрицы в поликристаллическом жаропрочном сплаве ЖС6У-ВИ, x5000.

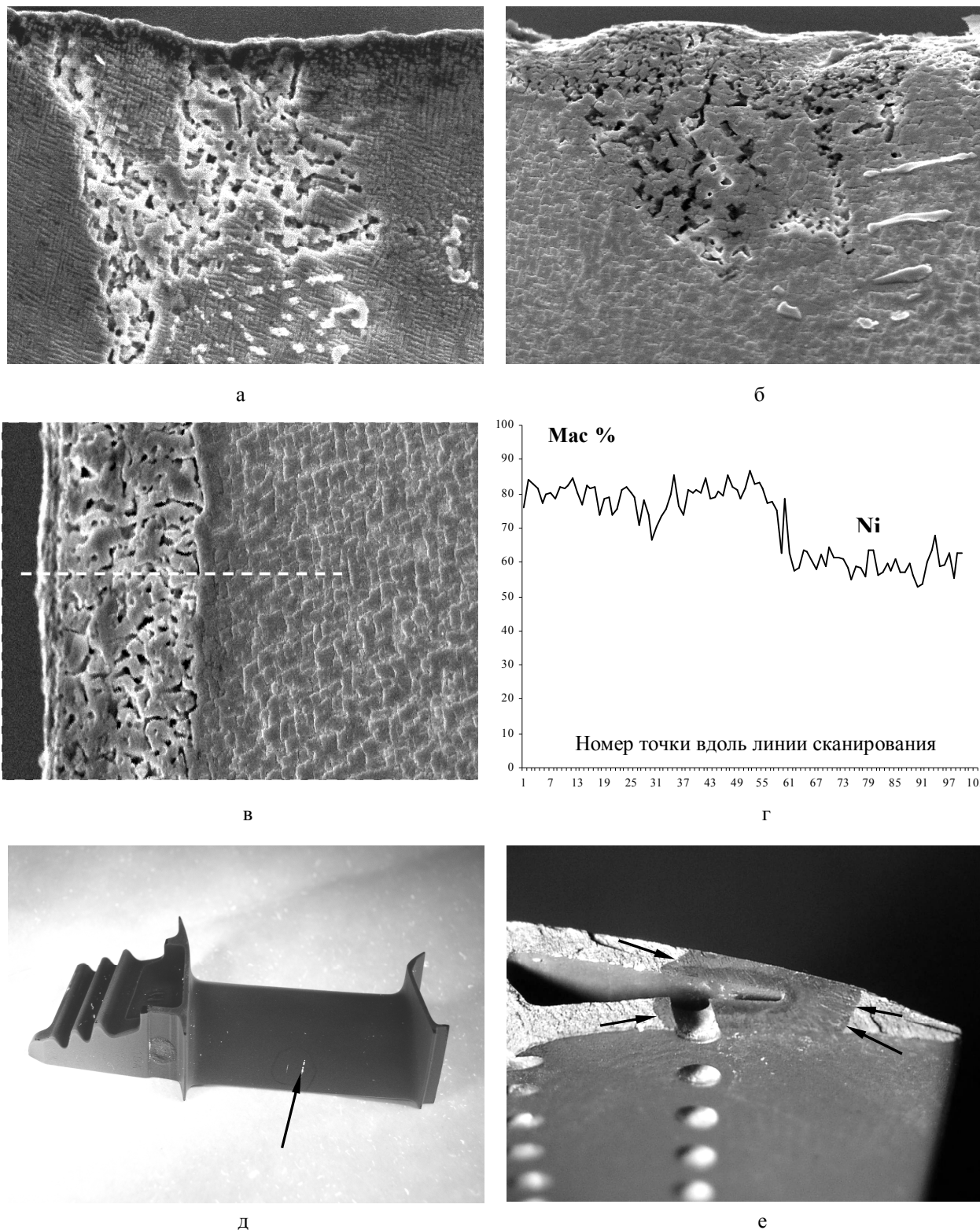


Рис. 2. Дефекты в монокристаллических рабочих лопатках турбины, образующиеся в процессе выщелачивания керамических стержней на основе корунда в автоклавах закрытого типа:
а – выщелачивание карбидов в лопатке ТВД из сплава ЖС32-ВИ (поперечный шлиф, $\times 2000$);
б – выщелачивание карбидов в лопатке ТНД из сплава ЖС26-ВИ (поперечный шлиф, $\times 4000$);
в – осаждение никеля на поверхности лопатки ТНД в процессе выщелачивания, $\times 5000$;
г – распределение никеля вдоль линии сканирования по шлифу на рис. 2, в;
д – водородная трещина выявленная на рабочей лопатке ТВД после сдаточных испытаний двигателя;
е – вскрытая водородная трещина в изломе рабочей лопатке ТВД, представленной на рис. 2д, $\times 10$

Исследование слоя никеля, выделившегося на поверхности монокристаллической рабочей лопатки турбины среднего давления (ТСД) из сплава ЖС26-ВИ в процессе автоклавного выщелачивания керамических стержней по технологии [5], позволило установить, что осажденный слой имеет пористое строение, а его толщина составляет порядка 10 – 20 мкм. Содержание никеля в слое по данным рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) достигает 80 – 90% мас. (рис. 2, в, г).

Выделение никеля на внутренней поверхности охлаждаемых каналов приводит к диффузии никеля на глубину до 150 – 200 мкм на операции термообработки отливок с образованием так называемой зоны «измененной структуры», отличающейся от исходного жаропрочного сплава не только структурой, но и свойствами.

Наиболее опасным дефектом, образующимся в пустотелых монокристаллических лопатках при выщелачивания керамических стержней в автоклавах закрытого типа, является образование в жаропрочных сплавах хрупких водородных трещин, развивающихся изнутри лопатки, и, в большинстве случаев, не выходящих на наружную поверхность.

Механизм развития водородных трещин в монокристаллических жаропрочных сплавах достаточно подробно рассмотрен в предыдущих работах [4, 8]. Необходимым условием развития водородных трещин является напряженно-деформированное состояние отливки лопатки и присутствие водорода в атмосфере автоклава.

Причиной появления растягивающих напряжений в отливке охлаждаемой лопатки является различие линейных коэффициентов теплового расширения жаропрочного сплава и корундового керамического стержня внутри отливки. В приближении одноосной модели, величина термических растягивающих напряжений в металле лопатки при остывании отливки от температуры кристаллизации сплава до комнатной температуры достигает значений пре-

Номер точки вдоль линии сканирования

дела текучести сплава. При температуре процесса выщелачивания керамических стержней растягивающие напряжения в отливках лопаток сохраняются на уровне 660 МПа [4].

Насыщение водородом рабочего объема автоклава происходит в результате взаимодействия щелочного раствора с субокислами алюминия, сохраняющимися в составе керамических стержней после их обжига, и в результате гидратации алюминия, титана, входящих в состав жаропрочных сплавов, и железа в составе стального корпуса автоклава.

Пример водородной трещины, образовавшейся в монокристаллической лопатке ТВД из сплава ЖС32-ВИ в процессе выщелачивания стержней в автоклаве закрытого типа, представлен на рис. 2, д, е. В связи с тем, что водородные трещины развиваются изнутри охлаждаемых каналов, их обнаружение представляет серьезную проблему. Представленная на рис. 2, д, е водородная трещина была выявлена после сдаточных испытаний.

Проблема вывода кислорода и водорода в процессе выщелачивания керамических стержней решена фирмой ROLLS-ROYCE методом периодической откачки автоклава, в котором выполняется процесс удаления стержней [9]. Однако, периодическая откачка приводит к снижению температуры щелочного раствора и снижению эффективности процесса выщелачивания корундовых стержней.

Способ выщелачивания керамических стержней с применением циклического изменения температуры и давления в рабочей камере. Более эффективным способом выщелачивания керамики является циклическое изменение температуры (и давления) в рабочем объеме автоклава в области фазового перехода вода-пар в защитной атмосфере инертного газа, реализованный в производстве ООО «АВДТ» [10]. Периодическое вскипание щелочного раствора способствует разрушению алюминатов, тормозящих процесс выщелачивания.

Конструкция автоклава состоит из контейнера с регулируемым давлением инертного газа, внутри которого расположен индукционный нагреватель и реакционная камера, накрытая крышкой, выполненная в виде открытого сосуда с двойными стенками. В реакционной камере находится щелочной раствор и обрабатываемые лопатки.

Процесс удаления керамических стержней осуществляется следующим образом. Посредством нагревателя температуру реакционной камеры повышают до температуры, превышающей температуру плавления щелочи на 5 – 10 °С при парциальном давлении паров воды, соответствующем фазовому переходу вода – пар. При повышении температуры щелочного раствора вода переходит в парообразное состояние, вытесняет из реакционной камеры защитную газовую атмосферу и конденсируется в зазоре между стенками реакционной камеры, препятствуя выходу пара из реакционной зоны.

После выдержки при указанных параметрах производят снижение температуры в реакционной камере на 10 – 20 °С ниже критической температуры пара, в результате чего вода конденсируется во всем объеме реакционной камеры, включая поры керамических стержней в отливках лопаток. В процессе снижения температуры происходит конденсация паров воды и повышение уровня щелочного раствора в реакционной камере.

Посредством мультипликатора периодически меняют давление инертного газа с амплитудой до 3 МПа и частотой до 5 раз в минуту, что позволяет управлять как положением уровня щелочного раствора в реакционной камере, так и эффектом вскипания и конденсации щелочного раствора в порах керамических стержней.

Конструкция реакционной камеры позволяет использовать защитную атмосферу, что существенно снижает содержание кислорода и водорода в реакционной зоне, предотвращает окисление упрочняющей γ' -фазы с образованием окислов алюминия

и осаждением чистого никеля на поверхности отливок лопаток, исключает развитие водородных трещин в монокристаллических лопатках.

Технология выщелачивания керамических стержней, применяемая в условиях ООО «АВДТ», была опробована на рабочих лопатках ТВД и ТНД производства ФГУП ММП «САЛЮТ». Исследование взаимодействия щелочных растворов на основе NaOH и КОН с жаропрочными сплавами ЖС6У-ВИ, ЖС26-ВИ и ЖС32-ВИ выполнили на лопатках, металлографических шлифах, а также на упругодеформированных образцах монокристаллического сплава ЖС26-ВИ, предназначенных для оценки склонности атмосферы автоклава к водородному охрупчиванию жаропрочных сплавов.

Исследование лопаток, прошедших операцию выщелачивания стержней по технологии ООО «АВДТ» показало полное и качественное удаление керамики из внутренних полостей, как монокристаллических лопаток из сплавов ЖС32-ВИ, ЖС26-ВИ, так и лопаток с равноосной макроструктурой из сплава ЖС6У-ВИ.

На внутренней поверхности охлаждаемых каналов не выявлено повреждений, связанных с травлением металлической матрицы жаропрочных сплавов, или выщелачивания карбидов.

На упругодеформированных образцах монокристаллического сплава ЖС26-ВИ, после выщелачивания по технологии ООО «АВДТ» водородных трещин не обнаружено.

Заключение

Методами металлографии, фрактографии, растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа выполнено исследование повреждения жаропрочных сплавов в охлаждаемых рабочих лопатках турбины в процессе удаления керамических стержней по различным технологическим схемам.

Установлено, что при удалении керамических стержней из пустотелых турбинных лопаток в расплаве бифторида калия происходит травление металлической матрицы. Более интенсивное травление отмечается на лопатках из жаропрочного сплава ЖС32-ВИ.

Удаление керамических стержней в автоклавах закрытого типа приводит к образованию таких дефектов, как выщелачивание карбидов на глубину до 50 мкм, анодное окисление упрочняющей γ' -фазы в присутствии кислорода с образованием окислов алюминия и чистого никеля, осаждающегося на поверхности лопаток, развитие водородных трещин в монокристаллических лопатках.

На производственных партиях лопаток опробована новая технология выщелачивания корундовых керамических стержней из монокристаллических лопаток, основанная на циклическом изменении давления и температуры в реакционной камере изостата в защитной атмосфере инертного газа.

Циклический переход через точку фазового превращения вода – пар при выщелачивании керамических стержней интенсифицирует удаление керамики, сокращает время технологического процесса, и уменьшает повреждение поверхности охлаждаемых каналов лопаток. Применение защитной атмосферы исключает появление таких дефектов, как осаждение никелевого слоя на поверхности лопаток и развитие водородных трещин в монокристаллических жаропрочных сплавах.

Литература

1. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины. Часть 2. Монография / В.А. Богуслаев, Ф.М. Муравченко, П.Д. Жеманюк и др. – Запорожье: ОАО «МОТОР СИЧ», 2003. – 420 с.

2. Поклад В.А., Оспенникова О.Г., Орлов М.Р. Восстановительный ремонт монокристаллических

рабочих лопаток турбины высокого давления из сплава ЖС32-ВИ // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 9 (25). – С. 17-21.

3. Орлов М.Р., Гасик М.И., Костенко Ф.Д. Взаимодействие литых жаропрочных никелевых сплавов с кислотными и щелочными электролитами // *Вестник двигателестроения*. – 2002. – № 1. – С. 157-164.

4. Орлов М.Р. Развитие водородных трещин в монокристаллических отливках охлаждаемых рабочих лопаток турбины ГТД // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2000. – № 2. – С. 23-27.

5. Богуслаев В.А., Гончаров В.И., Клочихин В.Г., и др. Способ удаления корундовых керамических стержней из внутренних полостей изделий. Патент Украины UA 8363 C1, Кл. В 22 D 29/00.

6. Насекан Ю.П., Иванов А.И., Замковой В.Е. и др. Способ очистки изделий от керамических стержней. Патент Украины UA 23106 A, Кл. В 22 D 29/00.

7. Sims C.T., Stoloff N.S., Hagel W.C. – *Superalloys* II, N.Y.: J.Wiley & Sons Inc., 1987. – P. 615.

8. Орлов М.Р. К вопросу о диагностике повреждений лопаток газотурбинных двигателей. // *Нові матеріали і технології*. – 2004. – № 2. – С. 19-23.

9. ROLLS-ROYCE PLC. A method of leaching ceramic, eg alumina, cores from turbine blade casting. GB2266677 (GB9305293.4) 15 Mar 1993. UKC Headings: B3F U1S Int. C1⁵B22D29/00.

10. Сноп В.И. Изостат для обработки материалов и способ удаления керамического материала из металлических изделий с его использованием. Патент Российской Федерации RU 2245220 C1. Кл. В 22 F 3/14, В 30 B 12/00.

Поступила в редакцию 30.05.2006

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