

УДК 621.45.024: 621.785.01

С. И. ПЛАНКОВСКИЙ, И. И. ГОЛОВИН, Ф. Ф. СИРЕНКО

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*

## АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАТОК ТУРБИН В ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

*В статье приведен обзор возможных типов загрязнений, способных возникнуть на поверхности лопаток турбин в газотурбинных двигателях, а также рассмотрены существующие на данный момент методы очистки выше указанных деталей, являющихся важной составляющей авиационного двигателя. Раскрываются проблемы образования высокотемпературных загрязнений на поверхности лопаток турбин и сложности, возникающие в процессе их удаления. Рассмотрены как положительные, так и отрицательные стороны существующих методов очистки поверхности лопаток турбин в газотурбинных двигателях, проведён их анализ и даны рекомендации по дальнейшему решению поставленной проблемы.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, термодинамическая устойчивость, методы очистки, продукты высокотемпературного окисления, сульфидная коррозия, лазерная очистка.

### Введение

Надежность газотурбинных двигателей в значительной степени зависит от надежности работы лопаток турбины, поскольку они являются наиболее нагруженными деталями. Лопатки подвергаются действию статических, динамических, циклических нагрузок, а также испытывают циклические термические напряжения, они работают в условиях агрессивной газовой среды при высокой температуре и подвергаются газовой коррозии.

Лопатки ротора газотурбинных двигателей (ГТД) изготавливают из никелевых жаропрочных сплавов, которые в сочетании с конструктивным исполнением определяют допустимую температуру рабочего газа перед турбиной, влияющую на основные характеристики двигателя: тягу, экономичность, ресурс и др.

Однако эти сплавы не обеспечивают достаточной стойкости к воздействию агрессивной среды газового потока двигателя. В газовой среде содержатся агрессивные компоненты, вызывающие образование на поверхности лопаток солевого осадка и резкое увеличение скорости разрушения поверхностного слоя металла. Газовые турбины нередко работают на топливе, содержащем повышенную концентрацию серы, что приводит к постепенному накоплению на поверхности лопаток осадка соли и протеканию сульфидной коррозии.

Термодинамическая устойчивость (ТДУ) продуктов высокотемпературного (ВТ) окисления и сульфидной коррозии жаропрочных Ni-сплавов создаёт проблемы их удаления при восстановительном ремонте турбинных лопаток.

Также следует заметить, что в лопатках, дисках турбин и других деталях из жаропрочных никелевых сплавов газотурбинных авиационных двигателей и двигателей энергетических установок при эксплуатации образуются под воздействием высоких температур и напряжений нежелательные изменения структуры и повреждения их целостности. Повреждениями целостности деталей являются как наружные трещины, так и внутренние несплошности типа микропор и микронадрывов в виде клиновидных трещин, зарождение и рост которых происходит по мере развития деформации ползучести. Подобные изменения структуры и повреждения целостности неизбежно приведут к преждевременному разрушению деталей при дальнейшей их эксплуатации. Во избежание аварийной ситуации по истечении определенного срока эксплуатации (наработки) детали необходимо подвергать восстановительному ремонту.

На данный момент существуют разные способы очистки и восстановления поверхности элементов ГТД, но всем им присущи свои недостатки. Целью данной работы является анализ существующих методов очистки и восстановительного ремонта, выявление наиболее рационального и приемлемого в условия постоянной растущей потребности в экономии средств и экологичности производства.

### Существующие методы очистки поверхности лопатки турбины в газотурбинных двигателях

На производстве и в процессе ремонта, как правило, сталкиваются с композицией различных

типов загрязнений. Это связано в большей мере с тем, что в процессе изготовления деталей, каждая операция обработки включает в себя множество факторов воздействия на деталь, а на этапах ремонта, возникают загрязнения, в основном, биологического характера (мелкие частицы песка, солевых отложений и т.п., в зависимости от характера эксплуатации ГТД), процесса износа деталей (стружка), использования специальных жидкостей (масла, консервационные жидкости, топлива и т.д.).

Все виды загрязнения имеют различную связь с очищаемой поверхностью. Можно выделить три основных вида связи:

1. Загрязнения, имеющие механическую связь с очищаемой поверхностью. Механическая связь происходит за счет сил трения. Например, частички стружки, шаржированные частицы абразива и т.п.

2. Загрязнения, имеющие химическую связь с поверхностью. Химические связи возникают за счет химического взаимодействия обрабатываемого материала с окружающей средой (окисные пленки, углеродистые отложения и т.д.).

3. Загрязнения, удерживаемые на поверхности за счет адгезии. Явление адгезии частиц и пленок связано с удержанием их на поверхности твердого тела за счет сил молекулярного взаимодействия, капиллярных сил в жидкости и ряда других причин. Адгезионную связь с поверхностью имеют различные лакокрасочные и жировые пленки, мелкие механические частицы.

Основная проблема, возникающая при ремонте охлаждаемых рабочих лопаток турбины и пустотелых сопловых лопаток, - очистка труднодоступных поверхностей каналов, покрытых слоем продуктов ВТ-окисления и сульфидной коррозии. Высокая ТДУ окислов к воздействию кислотных и щелочных электролитов, а также их высокая твердость не позволяют применять традиционные методы химической или гидроабразивной очистки поверхности для их последующего ремонта.

Необходимость ремонта турбинных лопаток определяется степенью деградации тонкой структуры жаропрочных сплавов, износом защитных диффузионных покрытий, развитием процессов ВТ-окисления и сульфидной коррозии, зарождением и развитием термоусталостных трещин (ТУТ).

Наиболее сложная проблема при ремонте турбинных лопаток – удаление ВТ-окислов с поверхности плотных ТУТ. Особенность ВТ-окисления Ni-сплавов, осложняющая процессы очистки, - формирование в Ni-матрице пластинчатых оксидов Al.

Существуют разные методы очистки поверхности турбинных лопаток от продуктов ВТ-окисления и сульфидной коррозии, но большинство из них заимствованы из технологии удаления керамических

стержней из пустотелых отливок и имеют присущие им недостатки.

Среди существующих методов очистки поверхности лопаток турбины можно выделить: очистка внутренних поверхностей ГТД при помощи смеси измельченного замороженного диоксана и сухого льда, промывка проточной части газотурбинного двигателя водным раствором сульфата гидроксилamina, метод автоклавной щелочной гидротермической обработки (ГТО), метод автоклавной щелочной термохимической обработки (ТХО), метод ультразвуковой очистки, восстановительная термообработка деталей в водородной атмосфере с последующим травлением в растворах кислот, метод фторуглеродной очистки фирмы Dayton Process B.V., метод лазерной очистки. Применение вышеперечисленных методов имеет как положительные, так и отрицательные стороны. Для выявления наиболее оптимального способа очистки поверхности лопатки турбины рассмотрим и проанализируем эти методы подробнее.

Промывка проточной части газотурбинного двигателя водным раствором сульфата гидроксилamina широко применялся с 1988 г. подразделениями ВВС США [1]. Согласно технологии данного метода удаление отложений с поверхности лопаток турбин двигателя происходит с использованием чистящей композиции, содержащей водный раствор сульфата гидроксилamina, хелатирующего агента. В данной чистящей композиции хелатирующий агент, это группа соединений, состоящая из сульфамата аммония, аммоний сульфида, гидроксилamin-О-сульфоновой кислоты и щелочных модификаторов. Последние изменяют кислотно-щелочной баланс рН системы до уровня между 6,5 и 14. Метод промывки проточной части ГТД водным раствором сульфата гидроксилamina предполагает наличие в корпусе двигателя специальных технологических окон, позволяющих осуществлять введение чистящей композиции непосредственно в турбину, минуя компрессор и камеру сгорания. После применения чистящей композиции необходимо промыть проточную часть двигателя водой.

Преимуществами данного метода являются возможности очистки поверхности лопаток турбин ГТД без его демонтажа, а наличие активных компонентов в чистящей композиции позволяет осуществлять очистку при комнатных температурах.

К недостаткам данного метода стоит отнести сложность приготовления чистящей композиции, дороговизну её компонентов и необходимость наличия специальных технологических окон в корпусе двигателя. Следует отметить, что данная методика была разработана для удаления абразивных частиц, песка и остатков продуктов горения с поверхности

лопаток турбин и в случае с сульфидной коррозией эффективность очистки значительно снижена.

Очистка внутренних поверхностей ГТД при помощи смеси измельченного замороженного диоксана и сухого льда проводится без демонтажа двигателя [2]. Диоксан это химическое вещество, известное также как 1,4-диоксан, диэтилендиоксид, 1,4-диоксид диэтиленгликоль. Это горючая, бесцветная жидкость, смешивающаяся с водой и большинством органических растворителей, имеющих температуру кипения  $101.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В описанном выше методе диоксан используется в твердой форме, для этого его предварительно замораживают и измельчают. В процессе очистки ГТД он приводится в движение при помощи вспомогательной силовой установки без подачи топлива в камеру сгорания и смесь измельченного замороженного диоксана и сухого льда вбрасывается в проточную часть двигателя. Для хранения смеси в замороженном состоянии и последующего её введения в проточную часть ГТД используется специальное оборудование. Смесь диоксана и сухого льда оказывает как абразивное воздействие на поверхности лопаток турбин, так и газодинамическое. Последнее заключается в создании ударной газовой волны при таянии диоксана и сухого льда по мере прохождения их смеси вдоль тракта ГТД. Оба вышеперечисленных фактора способствуют удалению загрязнения с поверхности лопаток турбин двигателя.

Основным недостатком выше описанной технологии является взрывоопасность диоксана. Только благодаря выделению большого объема углекислого газа при таянии сухого льда возникает “пожаротушающий” эффект и возможно использование этого метода очистки. Отдельное же хранение и транспортировка диоксана по причине его взрывоопасности очень проблематичны.

Метод автоклавной щелочной гидротермической обработки (ГТО) [3 - 5] и термохимической обработки (ТХО) [6, 7] в расплаве фторидов щелочных металлов сопровождаются эффектами взаимодействия электролитов со структурными и фазовыми составляющими Ni-сплавов.

Одним из серьезных недостатков, указанных выше методов, являются образования хрупких технологических трещин в охлаждаемых монокристаллических лопатках по механизму водородного охрупчивания жаропрочных сплавов.

Характерной особенностью водородных трещин, образующихся в охлаждаемых рабочих лопатках турбины с монокристаллической макроструктурой, является их высокая плотность (ширина раскрытия, как правило, не превышает 1 мкм) и направление развития изнутри отливки без выхода на наружную поверхность пера лопатки.

Такие водородные трещины не выявляются существующими методами неразрушающего контроля. Этот дефект можно обнаружить методом люминесцентного контроля только в случае выхода водородной трещины на поверхность отливки, а также при ее вскрытии в процессе механической обработки проточной поверхности пера лопатки. В некоторых случаях трещины были обнаружены после обкатки лопаток на двигателе (рис. 1). Случай множественного поражения отливки рабочей лопатки водородными трещинами, приведшего к ее разрушению в процессе автоклавного выщелачивания керамических стержней, приведен на рис. 2а и 2б.

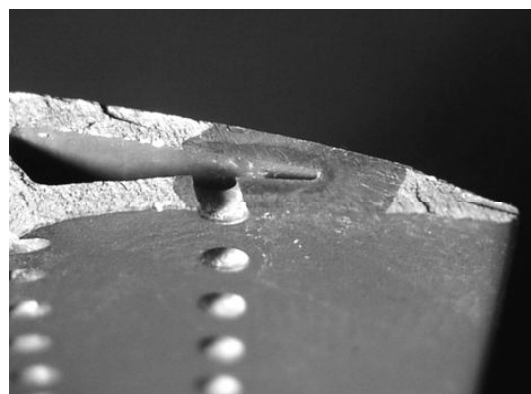


Рис. 1. Водородные трещины в монокристаллических лопатках ТВД. Трещина, выявленная после сдаточных испытаний двигателя Д-18Т

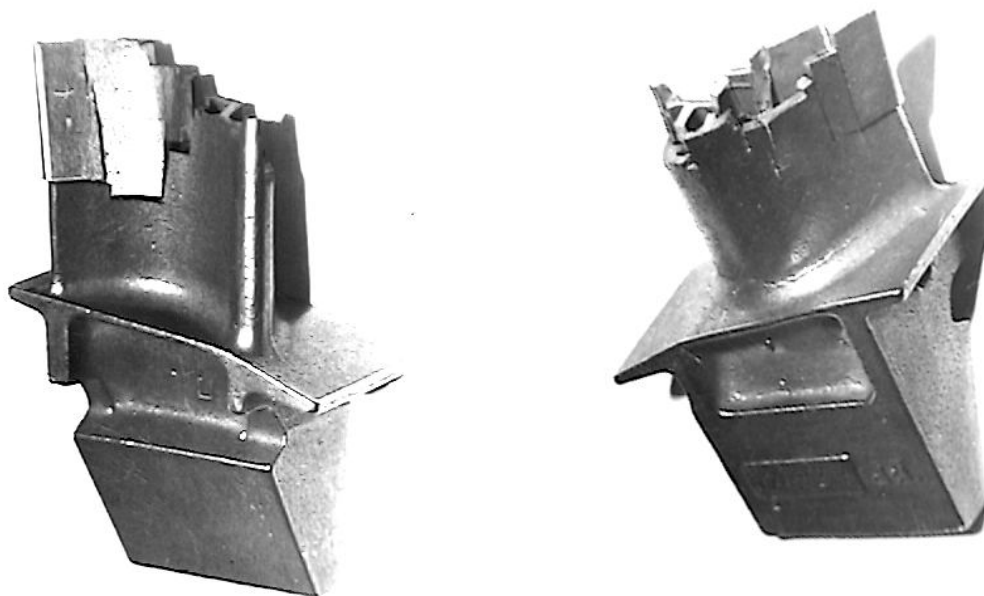
Ультразвуковая очистка – способ очистки поверхности твердых тел, при котором в моющий раствор вводятся ультразвуковые колебания. Введение ультразвука позволяет не только ускорить процесс очистки, но и получить высокую степень чистоты поверхности, а также заменить ручной труд, исключить пожароопасные и токсичные растворители [8].

Метод ультразвуковой очистки можно разделить на три направления:

- ультразвуковая очистка в ваннах;
- направленная ультразвуковая очистка;
- контактная ультразвуковая очистка.

Наибольшее распространение получила ультразвуковая очистка в ваннах из-за ее универсальности. Для очистки поверхности лопатки турбины широко применяются ультразвуковые ванны, которые работают на частоте от 20 до 40 кГц при интенсивности излучения в моющую среду до  $2,5\text{ Вт/см}^2$ . Ультразвуковая очистка в таких ваннах эффективна, в основном, для наружных поверхностей деталей.

Ультразвуковая очистка осложнена на практике из-за требований и ограничений, накладываемых на технологические моющие среды, применяемые для ультразвуковой очистки:



а

б

Рис. 2. Водородные трещины в монокристаллических лопатках ТВД.  
Разрушение отливки лопатки в процессе выщелачивания керамического стержня

1. Наличие хорошей смачиваемости загрязнений и очищаемой поверхности.
2. Разрушение связи загрязнений с поверхностью и перевод загрязнений в раствор.
3. Стабилизация загрязнений в моющем растворе с целью предотвращения их ресорбции.
4. Минимальное воздействие на человека.
5. Моющая среда не должна вступать в химическое взаимодействие с материалом очищаемой детали.
6. Моющая среда должна быть полностью биоразлагаемой.

В результате восстановительной термообработки деталей в водородной атмосфере с последующим травлением в растворах кислот, применяемых для удаления защитных диффузионных покрытий [9] оксиды сульфидной коррозии и ВТ-окисления превращаются в полиметаллическую губку вследствие восстановления части переходных металлов, таких, как Ni, Co и Mo. Более устойчивые оксиды  $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $TiO_2$  присутствуют в составе полиметаллической губки в форме вкраплений.

Пористая структура восстановленной губки и полиметаллический гетерофазный состав позволяют растворить её в водных кислотных электролитах. Однако высокая ТДУ оксидов Ti и Al в водной среде не позволяет очищать таким способом плотные ТУТ, а макротравление деталей турбины для контроля качества очистки поверхности нарушает геометрию контактных поверхностей хвостовиков тур-

бинных лопаток.

Более эффективный способ очистки лопаток турбины ГТД от продуктов сульфидной коррозии и ВТ-окисления – метод фторуглеродной очистки фирмы Dayton Process B.V. Недостаток процесса – травление основного металла лопаток газообразной фтористоводородной кислотой с образованием летучих фторидов металлов, с появлением пористости на поверхности очищенных трещин и потерей геометрии контактных поверхностей “ёлки” хвостовика.

Метод лазерной очистки поверхности лопаток турбин состоит в удалении поверхностных загрязнений путем их перевода в газообразную или пылевую фракцию за счет лазерного нагрева [10].

Процессы лазерного нагревания, испарения и абляции материала с образованием плазмы, а также быстрое тепловое расширение и возникновение ударных волн лежат в основе механизмов лазерной очистки, в то время как свечение плазмы и акустический сигнал в воздухе могут быть использованы для контроля режимов и степени очистки.

В случае, когда очистка носит испарительный характер, большая часть энергии лазерного излучения тратится на нагрев поверхности – повышение потенциальной энергии поверхностных атомов и молекул и меньшая – на сообщение им кинетической энергии – тепловых скоростей, с которыми испаренные частицы собственно и удаляются с поверхности. При ударном механизме очистки примеси удаляют-

ся за счет возбуждения в материале ударной волны и улетают вместе с волной разгрузки в мелкодисперсной пылевой фракции; в этом случае температура нагрева значительно ниже, а скорости разлета, как правило, выше за счет того, что большая доля энергии лазерного излучения переходит в кинетическую энергию частиц.

Для метода лазерной очистки характерен такой недостаток, как низкое значение КПД технологических лазеров, которое составляет для твердотельных лазеров с ламповой накачкой 2-5% и для газовых CO<sub>2</sub>-лазеров 8-12%. Ситуация коренным образом изменилась в результате разработки и освоения серийного выпуска нового поколения лазеров – волоконных одномодовых с непрерывной выходной мощностью до 2 кВт, а также волоконных маломодовых и многомодовых лазеров соответственно до 10 кВт и до 50 кВт непрерывной выходной мощности, с КПД до 30%, благодаря чему их эксплуатационные расходы на энергопотребление и охлаждение оказываются в 3-5 раз меньше, чем у CO<sub>2</sub>-лазеров и примерно в 20-50 раз меньше, чем у твердотельных лазеров с ламповой накачкой. Волоконные лазеры, оснащенные оптоволоконными системами доставки излучения лазера в зону обработки и имеющие небольшие геометрические размеры, открыли новую технологическую страницу развития и внедрения лазерных технологий в машиностроении и родственных ей отраслях промышленности. Отсутствие в волоконных лазерах юстируемых узлов, а также расходных элементов и материалов обеспечивает высокую надежность их работы, и в процессе эксплуатации такие лазеры не требуют дорогостоящего обслуживания [11].

Более чем восьмилетний опыт эксплуатации оптоволоконных лазеров в промышленности США показал их высокую технико-экономическую эффективность [12].

### Заключение

Рассмотрена актуальная проблема очистки поверхности лопатки турбины в газотурбинном двигателе. Решение этой проблемы позволит расширить границы применения деталей газотурбинного двигателя, что в свою очередь снизит его эксплуатационные расходы. Как показал выполненный обзор, в настоящее время нет общепризнанной технологии очистки поверхности лопатки турбин от продуктов высокотемпературного (ВТ) окисления и сульфидной коррозии жаропрочных Ni-сплавов.

Как уже было описано выше, в большинстве случаев очистка поверхности лопаток турбин производится с применением жидких химических реагентов, требующих материальных затрат, дальнейшей

утилизации и загрязняющих окружающую среду. Обслуживающий персонал, осуществляющий текущий ремонт и очистку поверхности лопатки турбины подвергается дополнительной опасности при работе с указанными жидкими химическими реагентами. Как обсуждалось в предыдущем разделе существующие методы очистки поверхности лопатки турбины имеют свои недостатки и порой приводят к возникновению разрушений и локальных деформаций в очищаемых образцах. И в заключение, после проведения очистки требуется провести работы по сборке и балансировке ротора турбины.

Лазерная очистка поверхности пера лопатки (рис. 3) с такой задачей справляется достаточно высокопроизводительно и к тому же иногда придает дополнительные свойства очищенному сплаву за счет специфической модификации поверхностного слоя.



Рис. 3. Очистка турбинных лопаток от эксплуатационных загрязнений.  
Очищенная лопатка

В условиях производства очень важным фактором является возможность быстрого перехода с обработки одного вида деталей на другой или перехода с одного рабочего места на другое. Лазерный пучок в сочетании с современными средствами компьютерного управления позволяет реализовать эти возможности. Перевод лазерной обработки материалов с одного рабочего места на другое или с одного технологического процесса на другой может составлять несколько секунд, в этом проявляется гибкость лазерного пучка, как технологического инструмента.

Производительность лазерной обработки обеспечивается ее высокой скоростью – скорость резки до 1000 см/мин, скорость сварки до 30 см/сек, скорости термообработки до 200 см<sup>2</sup>/мин позволяют

судить о лазерном пучке, как о высокопроизводительном обрабатывающем инструменте.

Применение мобильных лазерных установок для выполнения очистки лопаток турбин делает возможным производить очистку без демонтажа лопаток. Это существенно сокращает время выполнения регламентных работ и, соответственно, позволяет экономить средства за счет уменьшения времени простоя дорогостоящего оборудования.

Остаётся неясным точное значение плотности мощности лазерного пучка и длина его импульса в зависимости от вида детали и степени загрязнения. Данный вопрос может послужить темой для дальнейшего исследования.

В связи с решением поставленной задачи возникнет вопрос о возможности контроля степени очистки поверхности детали. Известно, что при взаимодействии лазерного излучения (с параметрами, характерными для процесса лазерной очистки) с металлом тонкий поверхностный слой быстро разогревается и возникает «лазерная искра», излучающая свет. Спектр излучаемого света несёт информацию о химическом составе поверхности. Для ответа на вопрос, возможно ли это явление использовать в целях контроля качества очистки, необходимо более подробно изучить данную проблему.

В начале данной статьи был затронут вопрос о восстановлении поверхности элементов ГТД. Вышеназванный процесс связан с дозированным удалением изношенного покрытия с поверхности детали, толщина которого может составлять несколько микрон. Большинство из рассмотренных методов очистки не способны дать желаемый результат по данному вопросу. Следует отметить, что свойства лазерного излучения, как универсального инструмента, проявляются в самых различных технологических возможностях обработки материалов, таких как локальность обработки в пространстве и во времени, прецизионность.

Локальность обработки в пространстве и во времени заключается в возможности сосредоточить энергию лазерного излучения мощностью в мегаватты в объеме от нескольких десятков до нескольких сот микрон и во времени несколько десятков пикосекунд. Столь высокая локальность позволяет обрабатывать строго определенные участки детали с минимальными зонами термического влияния.

Прецизионность перемещения пучка лазера в пространстве обеспечивается компьютерными системами управления и механизмами перемещения, например, роботами, координатными столами, которые обеспечивают точность позиционирования от микрона до сотен микрон. Столь высокие точности перемещения позволяют обеспечивать высокую технологическую воспроизводимость технологиче-

ских процессов.

Возможно, применение лазера позволит справиться с задачей восстановления поверхности элементов ГТД. Более подробное изучение данной проблемы позволит нам ответить на этот вопрос.

## Литература

1. Пат. 4713120 А Соединённые Штаты Америки. Метод очистки газотурбинных двигателей [Текст] / Генри М. Х., Виллиамс А. К.; Заявитель и патентообладатель Объединённая технологическая корпорация "A Corp. Of Dehatford", Коннектикут. – № 004517/0723; заявл. 01.29.1986; опубл. 02.13.1986, Бюл. № 7. – 5 с.: ил.
2. Пат. 3074822 А Соединённые Штаты Америки. Метод очистки газовых турбин [Текст] / Волк У. К., Волкер Ф. И.; Заявитель и патентообладатель компания "Dudley Develbiss". – № 24,150; заявл. 22.04.1960; опубл. 21.01.1963, Бюл. № 28. – 9 с.: ил.
3. Пат. 2151026 С1 Российская Федерация, МПК 7 В 22 F 3/14. Изостат для обработки материалов в жидкости [Текст] / Сноп В. И.; Заявитель и патентообладатель Губенко Л. А., Сноп В. И. – № 99123273/02; заявл. 10.11.1999; опубл. 20.06.2000, Бюл. № 21. – 5 с.: ил.
4. Пат. 2166409 С1 Российская Федерация, МПК 7 В 22 F 3/14. Силовой модуль автоклава [Текст] / Сноп В. И.; Заявитель и патентообладатель Губенко Л. А., Сноп В. И. – № 2000127681/02; заявл. 10.05.2001; опубл. 10.05.2001, Бюл. № 6. – 7 с.: ил.
5. Пат. 2245220 С1 Российская Федерация, МПК 7 В 22 F 3/14. Изостат для обработки материалов и способ удаления керамического материала из металлических изделий с его использованием [Текст] / Сноп В. И.; Заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Автоклавы высокого давления и температуры". – № 2003134260/02; заявл. 26.11.2003; опубл. 27.01.2005, Бюл. № 11. – 4 с.: ил.
6. А.с. 1819296 АЗ СССР, МКИ 5С23G1/28. Расплав для очистки отливок от керамики [Текст] / Садреев Э. С., Логунов А. В., Шайдунов В. С., Белова Л. П., Егорова Г. Г., Харитонов В. П., Хлыстов Е. Н.; Заявитель и патентообладатель Уральский филиал научно-исследовательского института технологии и организации производства двигателей, Пермский филиал Государственного института прикладной химии. – № 4719125/26; заявл. 18.07.1989; опубл. 18.07.1989, Бюл. № 18. – 8 с.: ил.
7. Садреев, Э. С. Технология очистки внутренних полостей монокристаллических лопаток ГТД от керамики в расплаве фтористых солей [Текст] / Э. С. Садреев // *Авиационная промышленность*. – 2003. – № 1. – С. 43-45.
8. Голямина, И. П. Ультразвук [Текст] / И. П. Голямина. – М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1979. – 400 с.

9. Пат. 46104 Украина, МПК С 23 G 1/08. Способ очищения деталей с жаропрочных сплавов [Текст] / Орлов М. Р. ; Заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество "Мотор Сич". – № 98105492 ; заявл. 20.10.98 ; опубл. 15.08.2002, Бюл. № 5. – 6 с.: ил.

10. Лазерная очистка в машиностроении приборостроении [Текст]: учеб. пособие / В. П. Вейко, В. Н. Смирнов, А. М. Чирков, Е. А. Шахно. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 103 с.

11. Смирнов, В. Н. Очистка лазерным излучением [Текст] / В. Н. Смирнов, А. И. Скрипченко, В. М. Медвецкий // РИТМ. – 2008. – № 5. – С. 64-66.

12. Gapontsev, Valentin. Industrial Laser Solutions [Электронный ресурс] / Valentin Gapontsev // IPG Photonics. – Режим доступа: <http://www.industrial-lasers.com/articles/2006/03/ipg-photonics-announces-improved-2005-results.html>. – 03.20.2006.

Поступила в редакцию 31.10.2013, рассмотрена на редколлегии 11.12.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. каф. технологии производства авиационных двигателей А. И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ОЧИЩЕННЯ ПОВЕРХНІ ЛОПАТОК ТУРБІНИ У ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНАХ

*С. І. Планковський, І. І. Головін, Ф. Ф. Сіренко*

В статті наведено огляд існуючих типів забруднення, спроможних виникнути на поверхні лопаток турбін у газотурбінних двигунах, а також розглянуто сучасні методи очищення згаданих деталей, що є важливою частиною авіаційного двигуна. Розкриваються проблеми утворення високотемпературних забруднень на поверхні лопаток турбін та складності, які виникають у процесі їх видалення. Розглянуто як позитивні, так і негативні сторони існуючих методів очищення поверхні лопаток турбін у газотурбінних двигунах, проведено їх аналіз та додано рекомендації стосовно подальшого вирішення існуючої проблеми.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, термодинамічна стійкість, методи очищення, продукти високотемпературного окислення, сульфідна корозія, лазерне очищення.

## CONSIDERING OF THE EXISTENT TECHNIQUES OF CLEANING TURBINE BLADE SURFACE IN GAS TURBINE ENGINES

*S. I. Plancovskyy, I. I. Golovin, F. F. Sirenko*

This article shows the review of possible types of pollution which can appear on the surface of turbine blades in gas turbine engines. Moreover, considered were techniques of cleaning abovementioned parts being important element of aircraft engine. Formation problems of high-temperature pollution on the surface of turbine blades and complications arising during their removal are revealed. Both positive and negative aspects of existing techniques of cleaning turbine blade surface in gas turbine engines were considered. The techniques analysis was conducted and recommendation on further solution of given problem were presented.

**Key words:** gas turbine engine, thermodynamic stability, techniques of cleaning, product of high-temperature corrosion, sulfide corrosion, laser cleaning.

**Планковський Сергей Игоревич** – д-р техн. наук, професор, професор кафедри технології самолёто- і вертолётостроєння, Национальний аэрокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАИ», Харків, Україна, e-mail: sergplank@gmail.com.

**Головін Іван Іванович** – аспірант кафедри технології самолёто- і вертолётостроєння, Национальний аэрокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАИ», Харків, Україна, e-mail: golovinii@yandex.ru.

**Сіренко Фелікс Феліксович** – аспірант кафедри конструкції авіаційних двигателів, Национальний аэрокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАИ», Харків, Україна, e-mail: aedlab@gmail.com.