

УДК 621.452.3-226.2 : 621.78.019.8

С. И. ПЛАНКОВСКИЙ¹, Е. С. ПАЛАЗЮК², В. О. ГАРИН¹, Ю. В. ДЬЯЧЕНКО¹¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*² *Компания «Роберт Бош», Ческе-Будеевице, Чешская Республика*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ТУРБИН ГТД НА СКЛОННОСТЬ К ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ КОРРОЗИИ

Проведен анализ основных причин разрушения деталей проточной части газотурбинных двигателей (ГТД). Показаны основные тенденции развития технологий финишной обработки кромок и поверхностей лопаток, изготовленных из жаропрочных сплавов. Для оценки влияния термоимпульсной обработки лопаток ГТД на их эксплуатационные характеристики проведены ускоренные испытания образцов лопаток на склонность к высокотемпературной газовой коррозии, которые заключаются в последовательном химическом травлении, электрохимической и высокотемпературной обработке. При помощи сравнительного анализа толщины коррозионного слоя после проведения испытаний показано отсутствие влияния термоимпульсного и лазерного методов удаления заусенцев на склонность лопаток ГТД к высокотемпературной газовой коррозии.

Ключевые слова: ГТД, лопатка, высокотемпературная газовая коррозия, жаропрочный сплав, заусенец, термоимпульсная обработка, ускоренные испытания, коррозионный слой.

Введение

Одними из наиболее ответственных деталей газотурбинных двигателей (ГТД) являются лопатки турбины, поскольку от их эксплуатационных характеристик зависит максимальная температура газа в турбине, её надежность и ресурс работы, удельная мощность и экономичность двигателя [1, 2]. Помимо высоких температур рабочие лопатки турбины подвержены высоким внутренним напряжениям, а также возможности возникновения резонансных колебаний, что делает их наиболее сложными элементами современной техники. На лопатках недопустимы механические повреждения, трещины, коррозионные язвы, следы общей коррозии, изменяющие рабочее сечение по сравнению с проектным [3, 4].

Несмотря на большое разнообразие специально разработанных жаропрочных сплавов на никелевой или кобальтовой основе, дополнительно легированных хромом, вольфрамом, молибденом, алюминием, титаном и другими металлами, все они в той или иной степени подвержены сульфидно-оксидной коррозии [5, 6]. Интенсивность протекания сульфидно-оксидной коррозии в некоторых случаях может быть настолько велика, что лопатки газовых турбин могут выйти из строя в течение нескольких сот часов. Данный вид коррозии является чрезвычайно опасным, что обуславливает пристальное внимание к нему со стороны специалистов, занимающихся проектированием, изготовлением и эксплуатацией газовых турбин [7, 8]. Кроме сульфидно-

оксидной коррозии сплавы на никелевой основе также подвержены газовой коррозии – разрушению при минимальном содержании влаги не более 1% и действии высоких температур [9].

Анализ дефектов и характера разрушений деталей проточной части ГТД показывает, что в большинстве случаев зарождение и развитие трещин происходит на кромках в поверхностном слое материала [10, 11]. Это объясняется более высокой нагруженностью поверхности детали, так как точки, наиболее близко расположенные к наружной поверхности детали, испытывают наибольшие нормальные и касательные напряжения, а наличие различных поверхностных дефектов способствует появлению концентраторов напряжений и увеличению действия сил и моментов.

Постановка задачи экспериментального исследования

С целью предупреждения разрушения лопаток, работающих в агрессивных условиях проточной части ГТД, наряду с развитием в области жаропрочных сплавов и термобарьерных покрытий, параллельным направлением повышения эксплуатационных характеристик ответственных элементов ГТД является обеспечение высокого качества их изготовления.

Вне зависимости от способа получения заготовок конечная форма лопаток зачастую достигается

путем механической обработки, основную долю операций которой составляет фрезерование. Также может применяться лазерная, электрохимическая, электроискровая и электроимпульсная обработка [12].

Однако все виды механической обработки, основу которых составляют процессы резания, сопровождаются образованием различного рода дефектов – заусенцев на кромках и микрочастиц на поверхностях деталей [13]. Даже при использовании современных обрабатывающих центров и оптимизации режимов обработки избежать этих явлений невозможно, поскольку они являются проявлениями законов механики сплошных сред.

С точки зрения обеспечения требуемого качества финишной обработки поверхностей и кромок высокоточных деталей, какими являются лопатки ГТД, наиболее перспективным является термоимпульсный метод обработки детонирующими газовыми смесями, получивший развитие в работах Национального аэрокосмического университета «ХАИ». Данному методу присущ ряд таких преимуществ, как универсальность, гибкость, высокая производительность, возможность групповой обработки, возможность одновременной обработки наружных поверхностей и внутренних полостей, возможность автоматизации процесса, стабильность результатов обработки, широкая номенклатура обрабатываемых материалов и др. При термоимпульсной обработке заусенцы оплавляются и удаляются с последующим сбросом продуктов сгорания из рабочей камеры до начала их конденсации на поверхностях обрабатываемых деталей [14 - 16].

В зависимости от параметров теплового источника на поверхности обрабатываемого материала могут протекать разнообразные процессы: закалка, оплавление и аморфизация. Структура зоны термического влияния, которая образуется в результате теплового воздействия, обуславливает поверхностные свойства материала. Повышение коррозионной стойкости, микротвердости и износостойкости достигается при локальном измельчении зерна, образовании закалочных структур и аморфных слоев.

В результате экспериментальных исследований влияния лазерного излучения на коррозионную стойкость жаропрочных сплавов, подробно описанных в работе [17], установлено, что лазерная термообработка при режимах, не приводящих к оплавлению обрабатываемых поверхностей, повышает устойчивость жаропрочных сталей и сплавов к коррозии в высокотемпературных окислительных средах. Однако, несмотря на имеющиеся многочисленные положительные примеры использования лазерной обработки в данных технологических целях, механизм фазовых и структурных превращений,

протекающих в поверхностных слоях жаропрочных сталей и сплавов различного состава, все еще остается не до конца изученным.

Таким образом, для подтверждения целесообразности и пригодности термоимпульсного способа удаления заусенцев с кромок деталей, изготовленных из жаропрочных сталей и сплавов, в случае обработки лопаток турбин ГТД необходима оценка ее влияния на одну из важнейших эксплуатационных характеристик обрабатываемых изделий, а именно на склонность к противостоянию высокотемпературной газовой коррозии. Также в рамках текущего экспериментального исследования для сравнительного анализа было решено рассмотреть влияние технологии лазерного удаления заусенцев. Однако в отличие от противокоррозионной обработки в случае удаления заусенцев при помощи лазерного луча влияние на обрабатываемую деталь заключается в появлении зоны термического влияния в процессе оплавления заусенца и перемещении границы плавления к геометрической кромке.

Ускоренные испытания образцов лопаток ГТД на высокотемпературную газовую коррозию

В ходе исследований использовался стенд для термоимпульсной обработки модели Т-15, который находится в лаборатории термоимпульсных технологий Национального аэрокосмического университета «ХАИ» (рис. 1, а). Он позволяет решать различные задачи, связанные как с проверкой и уточнением математических моделей процесса термоимпульсной отделки кромок деталей, так и с выявлением основных закономерностей, влияющих на оптимизацию технологических режимов обработки и её качество в целом.

Для обработки кромок лазерным методом использовалась современная ручная лазерная рабочая станция модели ALS 100, находящаяся в лаборатории Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт» (рис. 1, б). Данная рабочая станция подходит для случаев лазерной обработки как опытных образцов, так и в условиях промышленного производства небольших партий деталей.

Экспериментальное исследование проводилось на примере обработки сопловых лопаток ГТД, выполненных из жаропрочного сплава на никелевой основе ЖС26-ВИ. Лопатки были изготовлены методом высокоскоростной направленной кристаллизации. Химический состав данного сплава согласно ТУ1-92-177-91 приведен в табл. 1 [18].

Таблица 1

Химический состав рабочих лопаток ГТД из сплава ЖС26-ВИ [18]

Легирующий элемент	Содержание, %
Углерод	0,12...0,18
Хром	4,3...5,6
Кобальт	8,0...10,0
Ванадий	10,9...12,5
Алюминий	5,5...6,2
Титан	0,8...1,2
Молибден	0,8...1,4
Железо	≤ 1,0
Ниобий	1,4...1,8
Кремний	≤ 3,0
Ванадий	0,8...1,2



а



б

Рис. 1. Оборудование для обработки кромок лопаток ГТД: а – экспериментальный стенд для термоимпульсной обработки Т-15; б – ручная лазерная рабочая станция ALS 100

Надежность лопаток турбин в условиях их работы в высокотемпературной газовой среде оценивается экспериментально проведением испытаний на различных стендах и установках.

В настоящее время наиболее распространенными являются следующие методы испытаний [19]:

- испытания лопаток в системе двигателя;
- автономные испытания лопаток на стендах;
- испытания лопаток в тиглях в расплавах солей;
- испытания лопаток в расплавах солей с электрохимическим воздействием;
- испытания лопаток с предварительным нанесением на их поверхность коррозионной обмазки.

В условиях постоянного роста требований к надежности и ресурсу газотурбинных двигателей особую актуальность приобретает решение вопросов, связанных с осуществлением ускоренной оценки ресурсных возможностей основных элементов двигателя, что в конечном итоге позволит более оперативно управлять их надежностью и ресурсом с минимальными временными и материальными затратами.

В данной работе использован метод ускоренных испытаний сопловых лопаток турбин ГТД, который позволяет получать коррозионные повреждения лопаток, аналогичные эксплуатационным [20]. Главным преимуществом этого метода является быстрота его практической реализации, время которой практически в 150 раз меньше длительности традиционных экспериментальных испытаний.

Ускоренные испытания сопловых лопаток турбин ГТД реализуются при помощи последовательности нагружений:

- травление образцов лопаток в электролите;
- электрохимическая обработка;
- высокотемпературная обработка в среде агрессивных газов.

На этапах травления и электрохимической обработки происходит формирование коррозионного слоя, эквивалентного эксплуатационному по толщине и составу продуктов коррозии.

В целях экономии материала, а также для удобства обработки на различных этапах испытаний и создания шлифов для изучения структуры материала, было целесообразно использовать небольшие по размерам образцы по сравнению с оригинальными лопатками. Для получения таких образцов были использованы две новые лопатки ГТД, которые разрезались на несколько частей (рис. 2). Поскольку целью экспериментального исследования являлось изучение эксплуатационного повреждения материала в поверхностном слое, лопатка разрезалась таким способом, чтобы полученные образцы имели плоские поверхности, облегчающие впоследствии процесс шлифования и полирования. Данная операция была осуществлена при помощи гидроабразивной резки, которая по сравнению с другими видами обработки материалов резанием гарантировала отсутствие термического воздействия на обрабатываемый материал и отсутствие выгорания легирующих элементов.

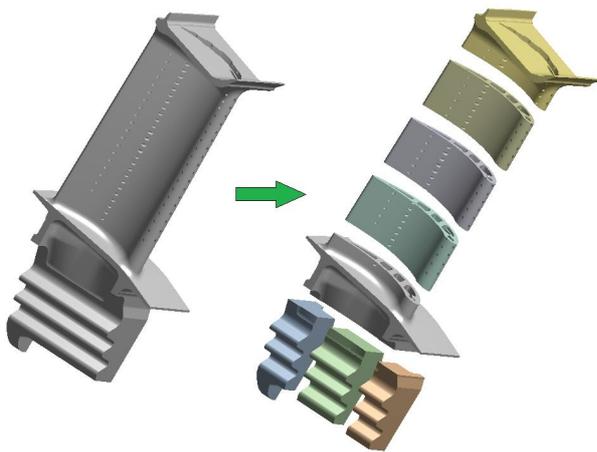
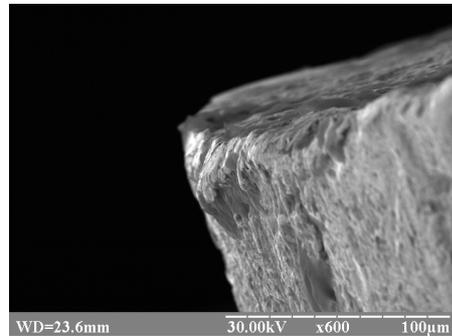


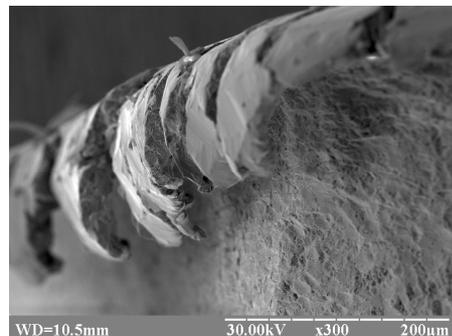
Рис. 2. 3D-схема порезки лопатки ГТД для получения образцов

Полученные образцы лопаток ГТД после порезки подвергались дополнительной механической обработке. Эта обработка заключалась во фрезеровании отдельных граней образцов, что позволяло получить на кромках образцов заусенцы с различными геометрическими характеристиками, поскольку

ку заусенцы, образовавшиеся после гидроабразивной резки, были незначительными, и представляли собой лишь небольшую часть выдавленного материала на кромке (рис. 3). Толщина заусенцев на исследуемых кромках образцов составляла порядка 25...30 мкм, а длина заусенцев при этом менялась от 170 до 190 мкм.



а



б

Рис. 3. Кромка образца лопатки ГТД:
а – после гидроабразивной резки;
б – после дополнительного фрезерования

Далее образцы были разделены на три группы:

- 1) образцы, которые не подвергались ни дополнительному фрезерованию, ни обработке интенсивными тепловыми потоками;
- 2) образцы, подвергавшиеся дополнительному фрезерованию и подлежащие термоимпульсной обработке;
- 3) образцы, подвергавшиеся дополнительному фрезерованию и подлежащие лазерной обработке.

Примеры кромок образцов после термоимпульсного и лазерного удаления заусенцев показаны на рис. 4.

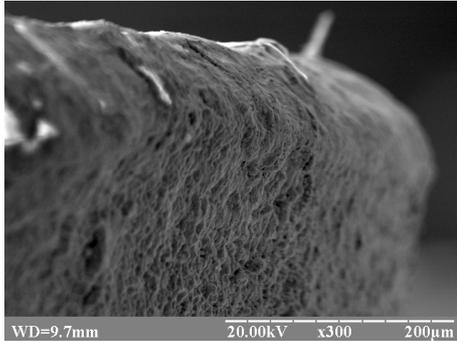
С целью уменьшения содержания легирующих элементов в поверхностном слое образцы первым делом подвергались травлению методом химического растворения. Для сокращения длительности испытаний травящий реактив наносился на образцы путем их погружения в раствор. Содержание легирующих элементов, соответствующее эксплуатаци-

онному, достигалось при погружении образцов в электролит, в состав которого входили:

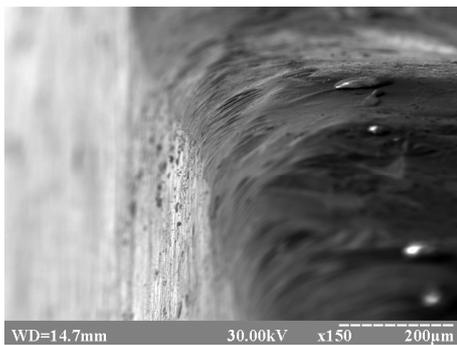
– 0,8 % раствор лимонной кислоты;

– 0,9 % раствор сульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (ингибитор).

Испытания проводились при комнатной температуре. Время травления составляло 5 минут. После травления поверхность образцов промывалась струей проточной воды.



а



б

Рис. 4. Кромки образцов лопатки ГТД после удаления заусенцев: а – термоимпульсным методом; б – лазерным методом

Электрохимическая обработка, позволяющая увеличить содержание серы и способствующая образованию оксидов в поверхностном слое образцов лопаток, проводилась на установке модели ЭЗИ-2М, которая находится в лаборатории электрохимической обработки Национального аэрокосмического университета «ХАИ» (рис. 5, а). Формирование поверхностного коррозионного слоя, эквивалентного эксплуатационному по толщине, происходит в результате электрохимической поляризации образцов в электролите, который содержит 15 % NaNO_3 , 5 % глицерина и 5 % Na_2S . Длительность обработки составляла 30 минут при силе тока $I = 500$ мА и температуре электролита 30°C . В виду малой длительности обработки нагрев электролита в процессе поляризации не учитывался.

После проведения процессов травления и электрохимической обработки испытываемые образцы

лопаток подвергались выдержке в условиях высоких температур при воздействии агрессивной газовой среды. Высокотемпературная обработка позволяет формировать коррозионный слой, эквивалентный эксплуатационному по микроструктуре и фазовому составу.



а



б

Рис. 5. Оборудование для проведения испытаний: а – установка для ЭХО модели ЭЗИ-2М; б – муфельная электропечь СНОЛ 15/1300

Для получения требуемой температуры во время проведения высокотемпературной обработки использовалась электрическая печь, что позволяло уменьшить энергетические затраты на испытания по сравнению с нагревом при помощи пламени газовой горелки или тока высокой частоты. В качестве печи в данном экспериментальном исследовании была использована муфельная электропечь СНОЛ 15/1300, предназначенная для проведения аналити-

ческих работ с различными видами термообработки при температурах до 1300°C (рис. 5, б). Получение коррозионного слоя на поверхностях испытуемых образцов происходило при использовании следующего температурного режима:

- нагрев до температуры 920°C;
- выдержка в течение 5 часов в среде агрессивных газов;
- охлаждение до комнатной температуры в течение 2,5 часов.

Агрессивная среда получалась путём разложения солей при высокой температуре. Преимуществом данного способа являются небольшие материальные затраты и пожарная безопасность экспериментальных исследований. В качестве оптимальных, с точки зрения создания необходимого состава и количества агрессивных газов, использовались навески карбоната магния $MgCO_3$ и сульфита натрия Na_2SO_3 . Требуемое количество этих солей определялось из условия получения одинакового количества газов SO_2 и CO_2 .

Анализ результатов экспериментального исследования

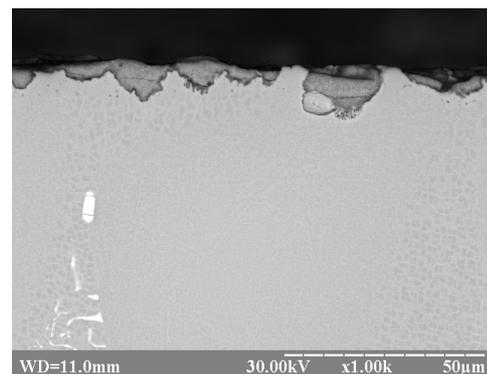
Исследование состояния поверхностного слоя образцов после проведения ускоренных испытаний на высокотемпературную газовую коррозию проводилось при помощи микроскопического анализа. Для этого перед проведением исследований готовились микрошлифы образцов. Для соблюдения плоскостности исследуемой поверхности при шлифовке образцы зажимались в специальную струбцину. В местах, где проводилось удаление заусенцев, поверхность образцов шлифовалась с использованием мелкозернистых шкур и постепенным уменьшением величины зернистости: 600 мкм, 400 мкм, 420 мкм и 100 мкм. Далее таким же образом микрошлифы полировались набором полировочных паст. Размеры зерна последовательно применяемых абразивных паст составляли: 60/40 мкм, 28/20 мкм, 10/7 мкм, 5/3 мкм и 1/0 мкм. Для промежуточной промывки использовался бензин.

После полирования образцы подвергались травлению в специально приготовленном растворе следующего состава: 2,5 г NaF, 35 г HCl, 10 г HNO_3 и 55 г H_2O , что являлось необходимым для проведения качественного анализа структуры материала в поверхностном слое.

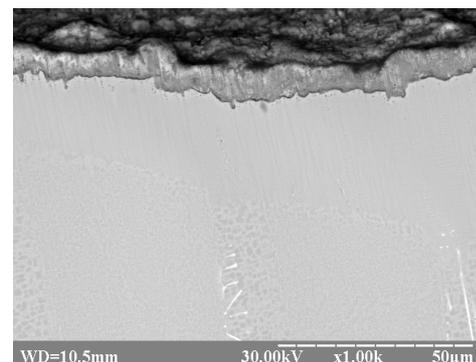
Оценка степени влияния термоимпульсного и лазерного способов удаления заусенцев с кромок лопаток ГТД, изготовленных из жаропрочных сплавов, проводилась путем сравнительного анализа толщины коррозионного слоя на кромках исследуемых образцов, где собственно и происходил процесс

плавления материала с формированием зоны термического влияния. При сравнении за основу было принято брать коррозионный слой на образцах, не подвергавшихся как фрезерованию, так и обработке интенсивными источниками тепла. В этом случае можно было оценить действительную сопротивляемость обрабатываемого материала высокотемпературной газовой коррозии.

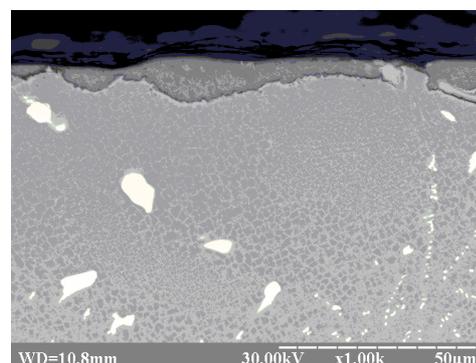
На рис. 6 представлены примеры фотографий коррозионного слоя на поверхностях рассматриваемых образцов, полученные при помощи электронного микроскопа.



а



б



в

Рис. 6. Коррозионный слой на кромках образцов, прошедших испытания: а – без обработки; б – после термоимпульсной обработки; в – после лазерной обработки

Коррозионный слой на кромке детали представляет собой зону, которая отличается по цвету от основного сплава. Принципиальных отличий в характере коррозионного слоя на испытанных образцах выявлено не было. Единственное отличие наблюдается лишь в незначительной прерывистости коррозионного слоя на кромке образца, который не подвергался воздействию источников тепла. В случае же термоимпульсной или лазерной обработки коррозионный слой на образцах получился более равномерным. При этом максимальная толщина коррозионного слоя на всех испытанных образцах составила порядка 10–13 мм (табл. 2).

Таблица 2

Толщина коррозионного слоя на испытанных образцах

Образец	Вид обработки	Толщина коррозионного слоя, мкм
№ 1	Без обработки	12
№ 2	Без обработки	10
№ 3	Термоимпульсная	10
№ 4	Термоимпульсная	12
№ 5	Термоимпульсная	12
№ 6	Термоимпульсная	10
№ 7	Термоимпульсная	11
№ 8	Лазерная	12
№ 9	Лазерная	10
№ 10	Лазерная	10
№ 11	Лазерная	13
№ 12	Лазерная	12

Исходя из полученных результатов, можно утверждать, что термоимпульсная обработка кромок лопаток ГТД, изготовленных из жаропрочных сплавов, не влияет на их эксплуатационные свойства, в частности, на склонность к высокотемпературной газовой коррозии, и, учитывая все сильные стороны данного метода удаления заусенцев, может быть использована в качестве перспективного метода финишной обработки.

Выводы

1. Проведен анализ основных причин разрушения деталей проточной части ГТД. В большинстве случаев зарождение сколов и трещин происходит на кромках в поверхностном слое материала. Развитию

данного рода дефектов способствует сульфидно-оксидная и высокотемпературная газовая коррозия, которой в большей степени подвержены лопатки ГТД.

2. Впервые для оценки влияния термоимпульсной обработки кромок высокоточных деталей ГТД, изготовленных из жаропрочных сплавов, на склонность к противостоянию высокотемпературной газовой коррозии применена методика ускоренных испытаний, позволяющая получать коррозионные повреждения лопаток, аналогичные эксплуатационным, за значительно меньшее время по сравнению с длительностью реальных эксплуатационных испытаний.

3. Сравнение микроструктуры образцов лопаток, прошедших ускоренные испытания, показало отсутствие влияния термоимпульсной обработки на склонность материала противостоять высокотемпературной газовой коррозии. По сравнению с исходными образцами существенных отличий не выявлено как в качественном, так и в количественном отношении, что делает термоимпульсный метод финишной обработки кромок высокоточных деталей из жаропрочных сплавов одним из наиболее перспективных.

Литература

1. Никитин, В. И. Коррозия и защита лопаток газовых турбин [Текст] / В. И. Никитин. – Л. : Машиностроение, 1987. – 272 с.
2. El-Sayed, A. F. Aircraft Propulsion and Gas Turbine Engines, Second Edition [Text] / A. F. El-Sayed. – Boca Raton : CRC Press, 2017. – 1476 p.
3. Карпов, Е. Н. Обобщение результатов исследований причин высокотемпературной коррозии [Текст] / Е. Н. Карпов, И. И. Тарасевич, Н. Н. Мотрий // Надежность и долговечность авиационных газотурбинных двигателей : сб. науч. тр. КИИГА, 1979. – С. 115–122.
4. Impact of defects and damage in aircraft engines on the exhaust jet [Text] / R. Adamczuk, C. Buske, I. Roehle, C. Hennecke, F. Dinkelacker, J. R. Seume // Proceedings of ASME Turbo Expo 2013. – San Antonio, Texas, USA, 2013. – P. 1–12.
5. Никитин, В. И. Влияние температуры на сульфидно-оксидную коррозию материала лопаток газовых турбин [Текст] / В. И. Никитин // Теплоэнергетика. – 1984. – № 1. – С. 30–33.
6. Failure analysis of gas turbine first stage blade made of nickel-based superalloy [Text] / A. M. Kolagar, N. Tabrizi, M. Cheraghzadeh, M. S. Shahriari // Case Studies in Engineering Failure Analysis. – 2017. – Vol. 8. – P. 61–68.
7. Гецов, Л. Б. Коррозия материалов и ее влияние на прочность энергоустановок [Текст] / Л. Б. Гецов. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2005. – 324 с.

8. Hot corrosion failure in the first stage nozzle of a gas turbine engine [Text] / B. Salehnasab, E. Poursaeidi, S. A. Mortazavi, G. H. Farokhian // *Engineering Failure Analysis*. – 2016. – Vol. 60. – P. 316–325.

9. Розенфельд, И. Л. Коррозия и защита металлов [Текст] / И. Л. Розенфельд. – М.: Металлургия, 1970. – 448 с.

10. Дубровський, С. С. Локалізація критичних зон пошкодження роторних деталей газотурбінних двигунів [Текст] / С. С. Дубровський // *Вісник Національного авіаційного університету*. – 2009. – № 3. – С. 6–10.

11. Иноземцев, А. А. Динамика и прочность авиационных двигателей и энергетических установок [Текст] / А. А. Иноземцев, М. А. Нихамкин, В. Л. Сандрацкий. – М.: Машиностроение, 2008. – 204 с.

12. Демин, Ф. И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей: Учебное пособие [Текст] / Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев // Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева». – Самара, 2012. – 324 с.

13. Махнаев, В. А. Бездоводочная обработка высокоточных корпусных деталей из цветных сплавов на многооперационных станках с ЧПУ [Текст] / В. А. Махнаев, Я. А. Коган, В. П. Савиных // *Авиационная промышленность*. – 1981. – № 1. – С. 30–31.

14. Лосев, А. В. Повышение эффективности зачистки деталей пневматических и гидротопливных систем при использовании термоимпульсного метода [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Лосев Алексей Васильевич. – Харьков, 1995. – 210 с.

15. Божко, В. П. Основы технологии зачистки деталей авиационного производства высокотемпературными газовыми импульсами [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.07.04 / Божко Валерий Павлович. – Харьков, 1993. – 314 с.

16. Современное состояние и перспективы развития технологий финишной отделки прецизионных деталей летательных аппаратов [Текст] / С. И. Планковский, А. В. Лосев, О. В. Шипуль, О. С. Борисова // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 2(69). – С. 39–47.

17. Шлякова, Е. В. Повышение стойкости к коррозии и износу поверхностей изделий из жаропрочных сталей и сплавов методом лазерной обработки [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / Шлякова Елена Валериевна. – Омск, 2009. – 150 с.

18. Жеманюк, П. Д. Структура и свойства литых лопаток авиационных двигателей из жаропрочного никелевого сплава ЖС26-ВИ после горячего изостатического прессования [Текст] / П. Д. Жеманюк // *Вестник двигателестроения*. – 2015. – № 1. – С. 139–146.

19. Гушваров, А. С. Методы испытаний на высокотемпературную газовую коррозию [Текст] / А. С. Гушваров, М. Н. Давыдов // *Вестник УГАТУ*. – 2014. – № 1(67). – С. 45–54.

20. Давыдов, М. Н. Метод ускоренных испытаний на высокотемпературную газовую коррозию сопловых лопаток турбин ГТД [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Давыдов Марсель Николаевич. – Уфа, 2006. – 147 с.

References

1. Nikitin, V. I. *Korroziya i zashchita lopatok gazovyh turbin* [Corrosion and protection of gas turbine blades]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1987. 272 p.

2. El-Sayed, A. F. *Aircraft Propulsion and Gas Turbine Engines, Second Edition*. Boca Raton, CRC Press, 2017. 1476 p.

3. Karpov, Ye. N., Tarasevich, I. I., Motriy, N. N. Obobshchenie rezultatov issledovaniy prichin vysokotemperaturnoy korrozii [Summary of research results of the high-temperature corrosion causes]. *Nadezhnost i dolgovechnost aviatsionnyh gazoturbinnnyh dvigateley : sb. nauch. tr.* Kiev, KIIGA, 1979, pp. 115–122.

4. Adamczuk, R., Buske, C., Roehle, I., Hennecke, C., Dinkelacker, F., Seume, J. R. Impact of defects and damage in aircraft engines on the exhaust jet. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2013*. San Antonio, Texas, USA, 2013, pp. 1–12.

5. Nikitin, V. I. Vliyanie temperatury na sulfidno-oksidnyuyu korroziyu materiala lopatok gazovyh turbin [Temperature influence on sulfide-oxide corrosion of gas turbine blade material]. *Teploenergetika*, 1984, no 1, pp. 30–33.

6. Kolagar, A. M., Tabrizi, N., Cheraghzadeh, M., Shahriari M. S. Failure analysis of gas turbine first stage blade made of nickel-based superalloy. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, 2017, Vol. 8, pp. 61–68.

7. Gecov, L. B. *Korroziya materialov i ee vliyanie na prochnost energoustanovok* [Corrosion of materials and its effect on the strength of power plants]. Saint Petersburg, SPGPU Publ., 2005. 324 p.

8. Salehnasab, B., Poursaeidi, E., Mortazavi, S. A., Farokhian, G. H. Hot corrosion failure in the first stage nozzle of a gas turbine engine. *Engineering Failure Analysis*, 2016, Vol. 60, pp. 316–325.

9. Rozenfeld, I. L. *Korroziya i zashchita metallov* [Corrosion and protection of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 448 p.

10. Dubrovskiy, S. S. Lokalizatsiya krytichnyh zon poshkodzhennya rotornyh detaley gazoturbinnnyh dviguniv [Localization of critical zones of rotor parts damage of gas turbine engines]. *Visnyk Natsionalnogo aviatsiynogo universytetu*, 2009, no. 3, pp. 6–10.

11. Inozemtsev, A. A., Nihamkin, N. A., Sandrackiy, V. L. *Dinamika i prochnost aviatsionnyh dvigateley i energeticheskikh ustanovok* [Dynamics and strength of aircraft engines and power plants] Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 204 p.

12. Demin, F. I., Pronichev, N. D., Shytarev, I. L. *Tehnologiya izgotovleniya osnovnykh detaley gazoturbimnykh dvigateley: Uchebnoe posobie* [Technology of manufacturing of the main gas turbine engines parts: Educational aid]. Federalnoe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshogo professionalnogo obrazovaniya «Samarskiy gosudarstvenniy aerokosmicheskiy universitet imeni akademika S. P. Koroleva», Samara, 2012. 324 p.

13. Mahnaev, V. A., Kogan, Ya. A., Savinyh, V. P. Bezdovodochnaya obrabotka vysokotochnykh korpusnykh detaley iz tsvetnykh splavov na mnogooperatsionnykh stankah s ChPU [Non-debugging treatment of high-precision base details made from non-ferrous alloys on multi-operational CNC machines]. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 1981, no. 1, pp. 30–31.

14. Losev, A. V. *Povyshenie ehffektivnosti zachistki detalej pnevmaticheskikh i gidrotoplivnykh sistem pri ispol'zovanii termoimpul'snogo metoda. Dis. ... kand. tehn. nauk* [Efficiency improvement of parts deburring of pneumatic and hydro-fuel systems using the thermal pulse method]. Kharkov, 1995. 210 p.

15. Bozhko, V. P. *Osnovy tehnologii zachistki detalej aviatsionnogo proizvodstva vysokotemperaturnymi gazovymi impul'sami. Dis. ... doct. tehn. nauk* [Fundamentals of deburring technology of aviation production parts with high-temperature gas impulses]. Kharkov, 1993. 314 p.

16. Plankovskiy, S. I., Losev, A. V., Shipul, O. V., Borisova, O. S. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy*

razvitiya tehnologiy finishnoj otdelki precizionnykh detalej letatel'nykh apparatov [Current state and development perspectives of finishing technologies of aircraft precision parts]. *Aviacionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya*, 2010, no. 2(69), pp. 39–47.

17. Shlyakova, Ye. V. *Povyshenie stojkosti k korrozii i iznosu poverhnostej izdelij iz zharoprochnykh stalej i splavov metodom lazernoy obrabotki. Dis. ... kand. tehn. nauk* [Increase of resistance to corrosion and wear of products surfaces made from heat-resistant steels and alloys by laser treatment]. Omsk, 2009. 150 p.

18. Zhemanyuk, P. D. *Struktura i svoystva litykh lopatok aviacionnykh dvigateley iz zharoprochnogo nikellevogo splava ZhS26-VI posle goryachego izostaticheskogo pressovaniya* [Structure and properties of cast blades of aircraft engines made from heat-resistant nickel alloy ZhS26-VI after hot isostatic pressing] / *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2015, no. 1, pp. 139–146.

19. Gishvarov, A. S., Davydov M. N. *Metody ispytaniy na vysokotemperaturnuyu gazovuyu korroziyu* [Test methods for high-temperature gas corrosion]. *Vestnik UGATU*, 2014, no. 1(67), pp. 45–54.

20. Davydov, M. N. *Metod uskorenykh ispytaniy na vysokotemperaturnuyu gazovuyu korroziyu soplovykh lopatok turbin GTD. Dis. ... kand. tehn. nauk* [Method of accelerated testing for high-temperature gas corrosion of turbine nozzle blades of GTE]. Ufa, 2006. 147 p.

Поступила в редакцию 1.02.2018, рассмотрена на редколлегии 4.04.2018

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕРМОІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ ЛОПАТОК ТУРБІН ГТД НА СХИЛЬНІСТЬ ДО ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ГАЗОВОЇ КОРОЗІЇ

S. I. Plankovskiy, Ye. S. Palaziuk, V. O. Garin, Yu. V. Dyachenko

Проведено аналіз основних причин руйнування деталей проточної частини газотурбінних двигунів (ГТД). Показано основні тенденції розвитку технологій фінішної обробки кромки і поверхонь лопаток, виготовлених з жароміцних сплавів. Для оцінки впливу термоімпульсної обробки лопаток ГТД на їх експлуатаційні характеристики проведено прискорені випробування зразків лопаток на схильність до високотемпературної газової корозії, які полягають в послідовному хімічному травленні, електрохімічній і високотемпературній обробці. За допомогою порівняльного аналізу товщини корозійного шару після проведення випробувань показано відсутність впливу термоімпульсного і лазерного методів видалення задирок на схильність лопаток ГТД до високотемпературної газової корозії.

Ключові слова: ГТД, лопатка, високотемпературна газова корозія, жароміцний сплав, задирка, термоімпульсна обробка, прискорені випробування, корозійний шар.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF INFLUENCE OF THERMAL PULSE DEBURRING OF GTE TURBINE BLADES ON THE TENDENCY TO HIGH-TEMPERATURE GAS CORROSION

S. I. Plankovskiy, Ye. S. Palaziuk, V. O. Garin, Yu. V. Dyachenko

One of the most important parts of gas turbine engines (GTE) are turbine blades, because from their operational characteristics depend the maximum gas temperature in a turbine, its reliability and service life, specific power and economy of an engine. Different mechanical damages, cracks, traces of general corrosion, changing their working section, are unacceptable on blades. Analysis of main causes of the parts destruction in GTE flow section shows that in most cases formation of shearing distortions and cracks occurs on blades edges in the surface layer of

material. The main reason for appearance of these defects are sulphide-oxide and high-temperature gas corrosion. The basic development tendencies of blades reliability increasing show, that together with the development of new heat-resistant alloys another possible way to prevent the destruction of blade material is increasing of blade manufacturing quality. The final shape of turbine blades is often achieved by machining, which leads to formation of burrs on the edges. Thermal pulse deburring has a large number of technological advantages and is the most promising method for finishing treatment of the surfaces and edges of GTE blades. However, despite the numerous positive examples of the application of laser treatment of blade surfaces in order to increase the corrosion resistance, the mechanism of phase and structural transformations, occurring in the surface layers of heat-resistant steels and alloys of different compositions, is still not fully understood. To estimate the effect of thermal pulse deburring of gas turbine blades on their operational characteristics, accelerated tests of blade specimens on the tendency to high-temperature gas corrosion have been carried out. The tests consist of sequential chemical etching in electrolyte, electrochemical treatment and high-temperature treatment in aggressive gases. These tests allow to obtain the same corrosion layer on blades surfaces, like after real operation. Also influence of laser deburring on corrosion resistance was estimated in parallel. The experimental study was carried out on the example of treatment of GTE nozzle blades made from a heat-resistant alloy on a nickel basis ZhS26-VI. Specimens were obtained by cutting two new blades into small parts by hydroabrasive cutting method to ensure that there is no thermal impact on the material being processed and no burn-out of the alloying elements. Obtained specimens of GTE blades after the cutting have been undergone by additional machining to obtain burrs at the edges, which were removed by thermal pulse and laser deburring methods. Investigation of the surface layer state of specimens after accelerated tests for high-temperature gas corrosion has been carried out by means of microscopic analysis. For this purpose, microslices of specimens have been prepared. Using a comparative analysis of the corrosion layer thickness after the tests, it was shown that there is no influence of thermal pulse and laser deburring methods on the tendency to high-temperature gas corrosion.

Keywords: GTE, blade, high-temperature gas corrosion, heat-resistant alloy, burr, thermal pulse deburring, accelerated tests, corrosion layer.

Планковский Сергей Игоревич – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: s.plank@khai.edu.

Палазюк Евгений Сергеевич – инженер по моделированию, подразделение технологий силовых агрегатов, компания Роберт Бош, Ческе Будеёвице, Чешская Республика, e-mail: ievgen.palaziuk@cz.bosch.com.

Гарин Вадим Олегович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: v.garin@khai.edu.

Дьяченко Юрий Вениаминович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: yu.dyachenko@khai.edu.

Plankovskiy Sergey Igorevych – Doctor of Technical Science, Professor of Dept. of Aircraft Manufacturing Technology, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: s.plank@khai.edu.

Palaziuk Yevgeniy Sergeyevich – Simulation Engineer, Division of Powertrain Solutions, ROBERT BOSCH, spol. s.r.o., České Budějovice, Czech Republic, e-mail: ievgen.palaziuk@cz.bosch.com.

Garin Vadim Olegovich – PhD, Assistant Professor of Dept. of Aircraft Manufacturing Technology, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: v.garin@khai.edu.

Dyachenko Yuriy Veniaminovich – PhD, Assistant Professor of Dept. of Aircraft Manufacturing Technology, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: yu.dyachenko@khai.edu.