

УДК 621.924.91:621.452.3-226.3

Т.П. НАБОКИНА, А.В. ГАЙДАЧУК, А.М. ГРУШЕНКО

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

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЛОПАТОК ГТД

*Приведены результаты исследований состояния внутренней поверхности реторт и технологической оснастки для электрохимического нанесения жаростойких и износостойких покрытий на лопатки ГТД после их обработки термогазодинамическим методом. Доказана возможность эффективной очистки оборудования от накопленных наслоений, которые ухудшают качество нанесения покрытий в последующих технологических циклах. Установлено, что шаржирование поверхности при воздействии на нее высокоскоростного гетерогенного потока «газ-электрокорунд» существенно зависит от угла его натекания, а скорость удаления покрытий зависит от фракций электрокорунда.*

**Ключевые слова:** термогазодинамическая очистка, гетерогенные потоки, электрокорунд, элементный состав, шаржирование поверхности.

### Введение

В процессе нанесения на лопатки жаростойких и износостойких покрытий электрохимическим методом на внутренней поверхности реторты и технологической оснастки происходит накопление (наслоение) сложных химических соединений неконтролируемого состава. При последующей загрузке (садке) сублимация и контакт этих соединений с основными применяемыми реагентами приводит к дефектам наносимых покрытий. В связи с этим необходимо полное удаление образовавшихся наслоений после 5-7 «садов».

В установившемся технологическом процессе реторту и оснастку очищают струйно-абразивным методом с применением нормального электрокорунда фракцией марки F20 по ТУ 4302-00-222226-016-93. Высокая твердость наслоений, их существенная толщина, адгезионная прочность, а также диффузионное внедрение элементов и химических соединений в основной материал реторты и оснастки, не дают желаемого результата от очистки и обеспечивают лишь кратковременный результат по бездефектному нанесению покрытий.

Эффективное удаление таких наслоений возможно при существенно больших энергиях соударения частиц абразивного материала с обрабатываемой поверхностью. Повышение кинетической энергии частиц возможно за счет увеличения скорости несущей газообразной фазы гетерогенного потока. Это возможно обеспечить путем увеличения его начальной энтальпии. Таким образом, речь идет о

создании технологии очистки оборудования, основанной на применении генераторов сверхзвуковых высокотемпературных газовых струй со сверхкритическим истечением продуктов сгорания, которые имеют характерную скорость до 1500 м/с, а скорость абразивных частиц при этом составит 600-800 м/с [1, 2].

### 1. Постановка задачи исследования

Решение проблемы ресурса авиационных двигателей во многом связано с повышением ресурса компрессорных и турбинных лопаток в условиях интенсивного абразивного и термического воздействий соответственно. Нарушение технологического процесса электрохимического нанесения износостойких и термостойких покрытий приводит к их характерным дефектам. Как показали наблюдения, полная очистка технологического оборудования со снятием не только накопленных наслоений, но и диффузионного слоя, насыщенного посторонними химическими элементами, обеспечивает заданное качество покрытий. Применение нетрадиционных в данной области, но хорошо известных методов термогазодинамической очистки сверхзвуковыми гетерогенными потоками [3] требует дополнительных исследований.

Во-первых, необходимо экспериментальное определение скорости удаления (резания) наслоений и самого материала реторты в зависимости от фракционного состава и вида применяемого абразивного материала, угла натекания гетерогенного потока и

расстояния среза сверхзвукового сопла от обрабатываемого объекта.

Во-вторых, необходим всесторонний элементный анализ состояния поверхности после обработки, с целью определения полноты удаления наслоений и диффузионного слоя.

В-третьих, необходим анализ внедрения (шаржирования) частиц абразивного материала в материал технологического оборудования в процессе очистки.

## 2. Решение проблемы

Экспериментальные исследования осуществлялись на контрольных образцах технологической оснастки для закрепления лопаток внутри реторты, которые имели аналогичные по своему составу и толщине наслоения, что и на внутренней поверхности реторты.

В качестве генератора сверхзвуковых гетерогенных потоков использовался очиститель, разработанный в НИЛ «Энергия» ХАИ, который обеспечивал скорость истечения несущего потока в диапазоне 1500 – 1600 м/с, что примерно соответствовало скорости разгона абразивных частиц 600 – 800 м/с [1].

Скорость снятия поверхностного слоя определялась на основании измерения времени очистки и результатов микрометрических измерений линейных размеров образцов.

Определение элементного состава обработанной поверхности осуществлялось на электронно-растровом микроскопе РЭМ-106.

Результаты предварительных исследований 3 образцов (рис. 1) до обработки показали: один из образцов имеет насыщенный серый цвет, отличающий его от остальных двух образцов.

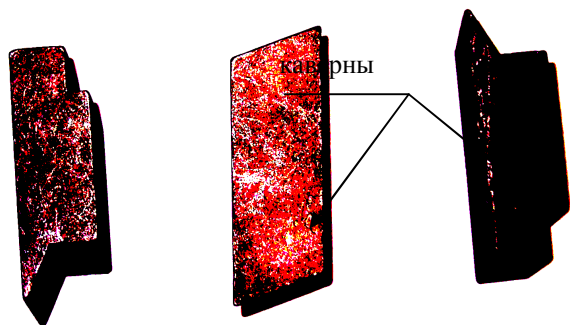


Рис. 1. Образцы до обработки сверхзвуковым гетерогенным потоком

Изучение элементного состава его поверхности показало, что данный образец участвовал в процессе алитирования. Два из трех образцов имеют каверны, образовавшиеся аналогично дефектам по-

крытия на лопатках. Были измерены средние глубины этих каверн с помощью микрометрического приспособления. Они составили от 0,04 до 0,09 мм. Достаточно очевидно, что глубина каверн примерно равна толщине «паразитных» наслоений на поверхности образцов. Последнее предположение подтверждается элементным составом поверхностей дна кратера каверны и его основания (рис. 2, 3).

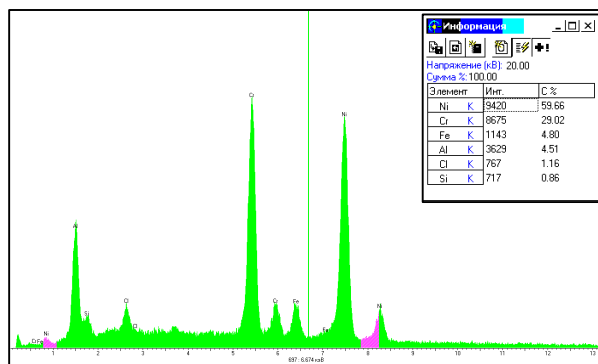


Рис. 2. Элементный состав поверхности образца по дну каверны

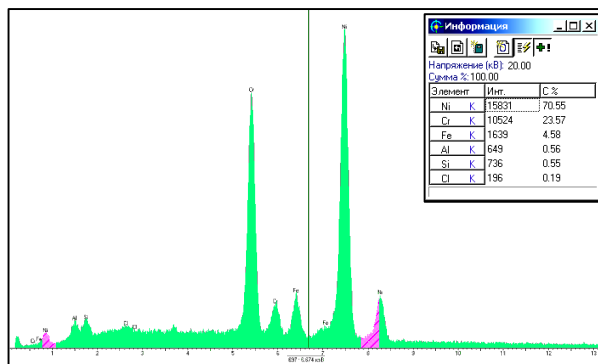


Рис. 3. Элементный состав поверхности образца по покрытию

Полученные предварительные результаты позволили определить требуемую толщину снятия покрытия и основного металла в диапазоне 0,2...0,3 мм для достижения гарантированного удаления «паразитного» и диффузионного слоев.

Обработка образцов осуществлялась тремя различными видами абразива-электрокорунда фракциями: 300, 170, 60 – 90 мкм. Обработка производилась в ручном режиме с фиксацией углов натекания гетерогенного потока 90 и 45°. Расстояние от обрабатываемой поверхности до среза сверхзвукового сопла выдерживалось в диапазоне 10-12 калибров сопла.

Толщины удаленного слоя покрытия для различных абразивов и пяти образцов сведены в табл. 1, 2.

Расчет скорости снятия покрытий показал, что для крупного абразива она примерно в 2 раза ниже,

чем для более мелких абразивов с той же твердостью по Моосу (7-8 единиц).

Таблица 1

Результаты микрометрических измерений линейных размеров образцов до и после обработки абразивом фракцией 300 мкм (время обработки 40 с)

№ образца	Фронтальный размер		Боковой размер	
	до обработки, мм	после, мм	до обработки, мм	после, мм
1	17,86	17,41	20,55	20,44
2	17,84	17,44	20,65	20,42
3	17,86	17,36	20,54	20,29

Таблица 2

Результаты микрометрических измерений толщины удаленного слоя для абразивов фракций 170 мкм (светлый абразив) и 60-90 мкм (темный абразив)

№ замера	Светлый абразив			Темный абразив		
	«понижение» после обработки, мм		Время обработки, с	«понижение» после обработки, мм		Время обработки, с
	Образец №4	Образец №5		Образец №4	Образец №5	
1	0,15	0,2	7	0,41	0,33	15
2	0,13	0,17		0,7	0,62	
3	0,19	0,18		0,6	0,62	

Микроскопические исследования состояния поверхности образцов после обработки показали, что процесс удаления наслоений представляет собой совокупность элементарных процессов резания отдельными частицами со всеми характерными для этого процесса особенностями – заусенцы, треки от частиц на поверхности (рис. 4 – 6).

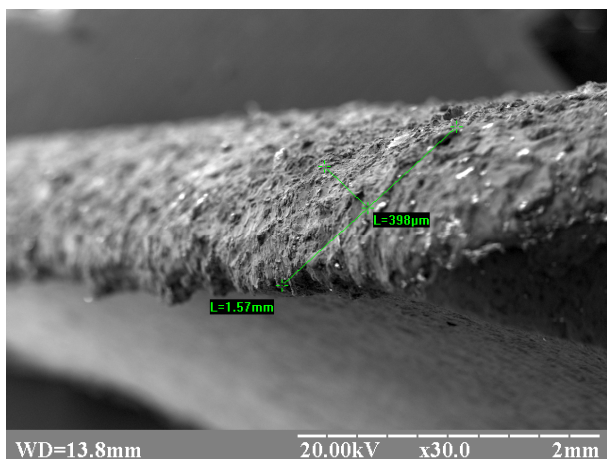


Рис. 4. Заусенцы на торцевой поверхности при обработке абразивом фракции 300мкм

Обтекание плоской грани образца гетерогенным потоком образует на ортогональной грани по направлению движения потока характерные для механической резки заусенцы.

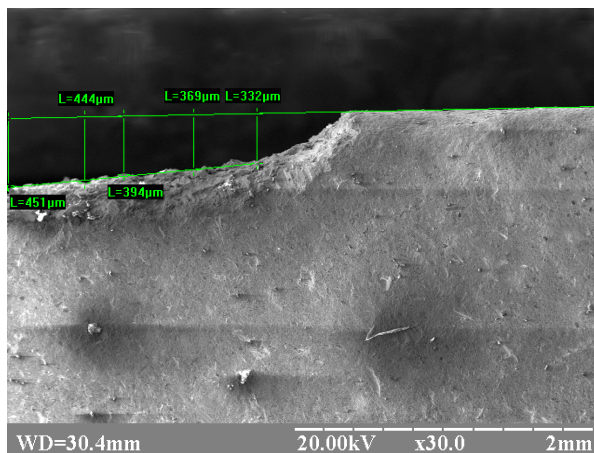


Рис. 5. Обтекание ортогонального уступа гетерогенным потоком приводит к образованию галтели до уступа (уступ образован приспособлением для фиксации образца, на рисунке не показан)

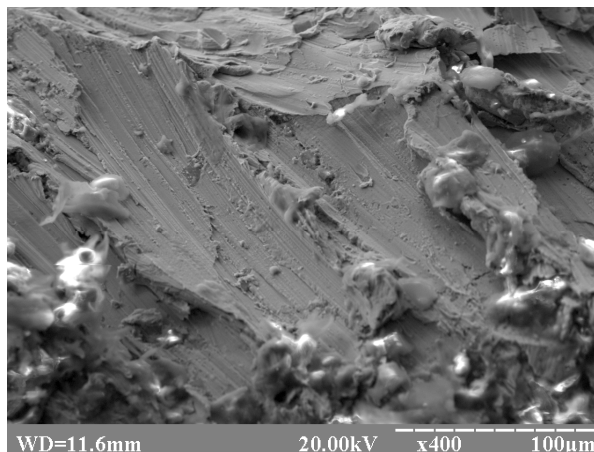


Рис. 6. Направленные бороздки от режущего воздействия электрокорунда

Характерная ширина образовавшихся бороздок составляет примерно 0,25-0,4 размера режущих частиц электрокорунда. Эта ширина физически равна их глубине и определяет шероховатость поверхности после обработки.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности применения для очистки технологического оборудования мелких абразивов – скорость обработки при этом увеличивается, а шероховатость поверхности уменьшается.

Последнее влияет на число допустимых обработок реторт.

Анализ шаржирования поверхности оборудования после обработки проводилось путем микроскопических исследований и исследований эле-

ментного состава поверхностей. При обработке варьировались углы натекания гетерогенной струи ( $45^\circ$ ;  $90^\circ$ ) и типы применяемых абразивов (крупной фракции 300 мкм и мелкой 60 – 90 мкм).

Установлено, что при натекании потока под углом  $45^\circ$  шаржирование поверхности практически не происходит (рис. 7) и наоборот, при ортогональном натекании шаржирование может достигать 30% обработанной площади (рис. 8).

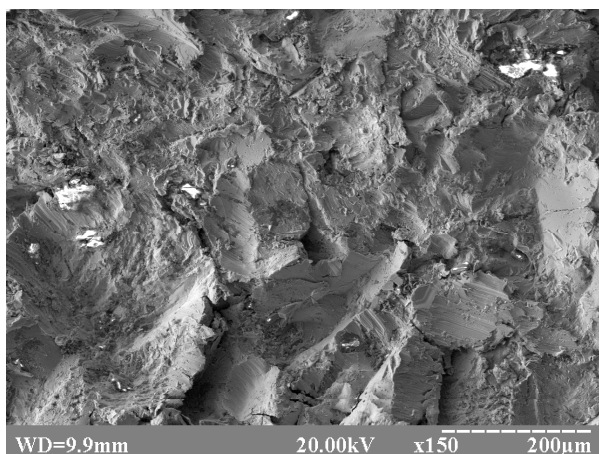


Рис. 7. Отсутствие шаржирования при боковом натекании под углом  $45^\circ$

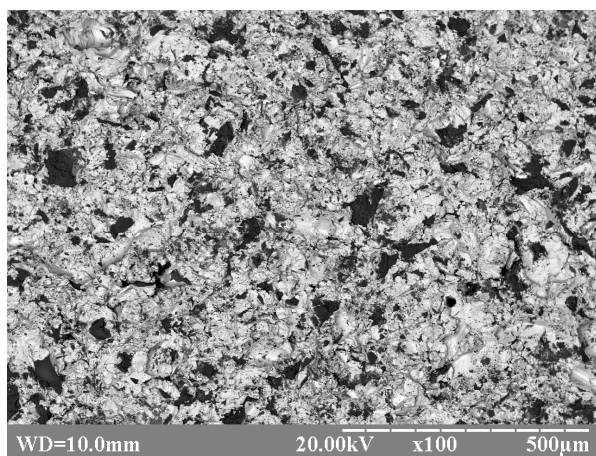


Рис. 8. Шаржирование при ортогональном натекании

Полученный результат позволяет сделать вывод о необходимости проводить обработку оборудования под углами не более  $45^\circ$ .

При этом тип применяемого абразива из числа испытываемых не играет существенной роли в шаржировании поверхности.

Элементный состав поверхности обработанных образцов при снятии примерно 0,05...0,1 мм основного материала оборудования показал, что при этом гарантированно удаляются химические элементы, диффундированные в атомарную структуру материала реторты (рис. 9).

Такой вывод можно сделать, сравнив элементный состав контрольного образца материала реторт с элементным составом обработанной поверхности, который представлен на рис. 9.

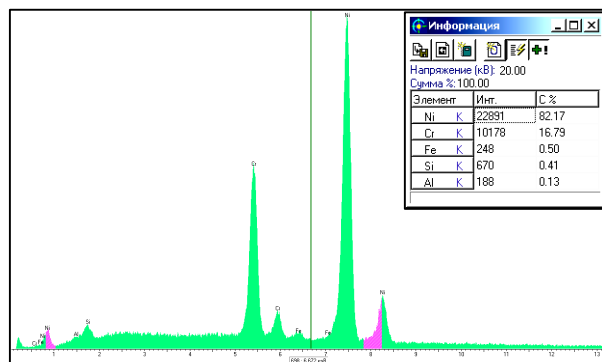


Рис. 9. Элементный состав поверхности обработанных образцов

## Заключение

Исследования показали.

1. Предложенный метод термогазодинамической очистки сверхзвуковыми гетерогенными потоками показал свою эффективность.
2. Применение мелких абразивов на основе электрокорундов предпочтительнее при очистке технологического оборудования.
3. Углы натекания гетерогенного потока примерно в  $45^\circ$  обеспечивают практическое отсутствие нежелательного эффекта шаржирования очищаемой поверхности.
4. Предложенный метод очистки позволяет удалять с поверхности технологического оборудования не только нежелательные с точки зрения технологии обработки лопаток покрытия, но и диффузионный слой, который может существенно влиять на качество последующих технологических процессов.
5. Выполненные исследования показали, что на их основе может быть создан механизированный комплекс для очистки реторт в процессе их эксплуатации, что в свою очередь позволит повысить качество наносимых износостойких и жаростойких покрытий.

## Литература

1. Кисель, В.М. Сверхзвуковая струя [Текст] / В.М. Кисель, Ю.И. Евдокименко, В.Х. Кадыров // Деньги и технологии. – 2000. – № 3(5). – С. 52 – 55.
2. Гайдачук, А.В. Расчет параметров мотокомпрессорных воздушно-реактивных двигателей технологического назначения [Текст] / А.В. Гайдачук, А.М. Грушенко, Т.П. Набокина // Авиационно-

космическая техника и технология. – 2010. – № 8 (75). – С. 7–10.

3. Использование сверхзвуковых технологических установок для повышения эффективности

коррозионной защиты трубопроводов [Текст] / А.В. Воронцовский, С.А. Сучков, Н.В. Ширяева и др. // Безопасность трубопроводов: докл. Междунар. конф. – М., 1997. – Т. 6. – С. 20–27.

Поступила в редакцию 25.05.2013, рассмотрена на редколлегии 13.06.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры С.С. Добротворский, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков.

### ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ТЕРМОГАЗОДИНАМІЧНИМ МЕТОДОМ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЛОПАТОК ГТД

*Т.П. Набокіна, О.В. Гайдачук, О.М. Грушенко*

Наведено результати досліджень стану внутрішньої поверхні реторт і технологічного оснащення для електрохімічного нанесення жаростійких і зносостійких покриттів на лопатки ГТД після їх обробки термогазодинамічним методом. Доведено можливість ефективного очищення обладнання від накопичених нашарувань, які погіршують якість нанесення покриттів в наступних технологічних циклах. Встановлено, що шаржування поверхні при впливі на неї високошвидкісного гетерогенного потоку "газ-електрокорунд" істотно залежить від кута його натікання, а швидкість видалення покриттів залежить від фракцій електрокорунду.

**Ключові слова:** термогазодинамічне очищення, гетерогенні потоки, електрокорунд, елементний склад, шаржування поверхні.

### INCREASE OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT CLEANING EFFICIENCY OF THERMOGAS DYNAMIC METHOD AT PRODUCTION OF GTE SHOULDER-BLADES

*T.P. Nabokina, O.V. Gaydachuk, O.M. Grushenko*

The results of researches of the state of retorts internal surface and technological rigging are resulted for the electrochemical causing of heat-resistant and wearproof coverages on the shoulder-blades of GTU after their treatment a thermogas dynamic method. Possibility of the effective cleaning of equipment is well-proven from the accumulated stratifications which worsen quality of overcoating in subsequent technological cycles. It is set that caricaturing of surface at affecting it of high-speed heterogeneous stream «gas-electro-corundum» substantially depends on the corner of his accumulating, and speed of delete of coverages depends on factions of electro-corundum.

**Key words:** thermogas dynamic cleaning, heterogeneous streams, electro-corundum, element composition, caricaturing of surface.

**Набокіна Татьяна Петровна** – инженер 1 кат. кафедры ракетно-космических двигателей и энергетических установок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: tnabokina@ukr.net.

**Гайдачук Александр Витальевич** – д-р техн. наук, проф., проректор по научной работе, зав. кафедры ракетно-космических двигателей и энергетических установок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.gaydachuk@khai.edu.

**Грушенко Александр Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры ракетно-космических двигателей и энергетических установок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aagrushenko@mail.ru.