

УДК 629.7.03.002.3:669

А.О. ГАРИН

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина***ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИСТОЧНИК ДЛЯ ИОННОЙ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛОПАТОК ГТД ПЕРЕД ОСАЖДЕНИЕМ ПОКРЫТИЙ**

*В статье произведен анализ существующих методов очистки лопаток газотурбинных двигателей, которые используются в промышленности перед осаждением покрытий. Выбран наиболее эффективный метод ионной очистки, в соответствии с поставленной технологической задачей. Проведен анализ применения существующих технологических источников для процесса ионной очистки инертным газом. Предложена расчетная модель процесса и методика выбора параметров технологического источника для ионной очистки поверхностей лопаток ГТД перед осаждением покрытий.*

**Ключевые слова:** *методы очистки поверхности, покрытия, очистка поверхности, автономный ионный источник, ускоритель ионов, тепловой режим.*

**Введение**

Развитие и увеличение использования авиационной техники, рост конструктивной сложности и стоимости ГТД требуют высокой надежности и долговечности деталей и узлов в частности лопаток компрессора и турбины. По мере развития и совершенствования авиационной техники постоянно растут параметры двигателей, надежность работы которых определяется уровнем технологичности производства изготовления компрессорных и турбинных лопаток, так как они являются наиболее нагруженными деталями. Лопатки компрессора подвергаются действию статических, динамических и циклических нагрузок, так же лопатки турбины испытывают циклично-термические напряжения, они работают в условиях агрессивной газовой среды при высокой температуре [1, 2].

Условия, при которых работают авиационные двигатели, не могут не сказаться на его деталях и узлах. Самыми нагруженными узлами являются компрессор и газовая турбина. При заборе воздуха на лопатки компрессора действует пылевая эрозия и циклические нагрузки. С увеличением рабочей температуры газа перед турбиной существенно увеличились напряжения лопаток газовых турбин, что приводит к снижению их долговечности в процессе эксплуатации. Они подвергаются действию газовой коррозии (оксидной и сульфидной), циклических, термических и циклично-термических напряжений, которые особенно влияют на покрытие.

Для увеличения стойкости покрытий необходимо качественно очистить поверхность лопатки перед напылением для увеличения адгезии. Поэтому необходимо с используемыми методами очистки

(перед формированием защитных покрытий) использовать такой метод, который бы позволил в вакуумной камере качественно очистить поверхность лопатки и активировать ее поверхность.

**Постановка проблемы.** Наличие загрязнений на поверхности детали существенно зависит от предыстории той или иной детали, то есть от условий их изготовления, хранения и транспортирования. Для обеспечения доступа атомов напыляемого металла непосредственно к обрабатываемой поверхности необходимо удалить имеющиеся на ней загрязнения и адсорбированные атомы, то есть очистить ее.

Вид очистки зависит от количества и состава поверхностных загрязнений [1 – 3]. В соответствии с последовательностью и характером проведения очистки различают: грубую и тонкую механическую очистку; грубую и тонкую химическую очистку; термообработку на воздухе и в вакууме; тонкую очистку и активацию поверхности в вакууме с помощью различных физических воздействий. Данные методы очистки обладают рядом недостатков и не обеспечивают необходимое качество подготовки поверхности для получения необходимых свойств покрытия, так как на поверхностях остаются следы ПАВ и их соединения со средой. Следовательно, необходимо удалить физически сорбированные частицы и химические соединения, образовавшиеся за время очистки лопатки вне камеры до момента ее поступления. Например, для активации поверхности в вакууме на ОАО «Мотор Сич» и ММП «Салют» применяют очистку поверхностей с помощью импульсных и инфракрасных ламп в высоком вакууме. Однако при этом полное удаление загрязнений с поверхности подложки не происходит, что обусловлено деструкцией и полимеризацией масел и раз-

личных органических загрязнений. Длительный нагрев может привести к диффузии примесных атомов в поверхностные слои, что в конечном итоге приводит к ухудшению качества нанесенного покрытия.

Наиболее качественным методом очистки является травление материалов с использованием быстрых (обладающих кинетической энергией, достаточной для физического распыления материалов) и химически активных частиц, образующихся в низкотемпературной неравновесной плазме газового разряда [4]. Процессы травления в газоразрядной плазме по физико-химическому механизму взаимодействия быстрых и химически активных частиц с атомами и молекулами на поверхности обрабатываемого материала можно разделить на 3 основных вида: ионное травление, плазмохимическое травление и ионно-химическое травление. Каждому типу травления присущи свои особенности: при ионном травлении для удаления поверхностных слоев материала используются ионы инертных газов с большой кинетической энергией; при плазмохимическом травлении для удаления поверхностных слоев материала используется энергия химических реакций между ионами и радикалами активного газа или пара и атомами или молекулами обрабатываемого материала с образованием летучих стабильных соединений; при ионно-химическом травлении для удаления поверхностных слоев материала используются как кинетическая энергия ионов химически активных газов, так и энергия их химических реакций с атомами и молекулами материала.

Существующие источники ионов, предназначенные для очистки быстрыми ионами поверхности, как правило, устанавливаются непосредственно в объеме вакуумной камеры, что может привести к возникновению ряда трудностей при обеспечении совместной работы с различными генераторами плазмы. Особое внимание стоит уделить тому, что рабочим веществом является инертный газ, который не вступает в реакцию ни с одним из известных веществ и передает свою энергию и импульс, создавая условия для десорбции и распыления загрязнений и газов, не образуя новых соединений. В качестве рабочего газа целесообразно выбрать аргон, так как из всех инертных газов он является самым дешевым.

Для этих целей целесообразно выбрать технологический источник, который удовлетворял бы следующим требованиям: в качестве рабочего тела использовался инертный газ; большая часть элементов конструкции находилась бы вне технологического отсека; отсутствие накаливаемых элементов.

## 2. Решение проблемы

Под технологические требования, предъявляемые к источнику, попадают плазменные ионные

ускорители (ПИУ), которые часто называют источниками Кауфмана [5, 6, 7]; распылительные системы дугового типа; магнетронные распылительные системы (МРС) [8, 9]; ускорители с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения (УЗДП) и ускорители с анодным слоем (УАС) [10, 11].

Характеристиками ПИУ являются плотность потока и энергия частиц. В современных ускорителях такого типа плотность потока ускоренных частиц достигает 0,3- 0,4 А/см<sup>2</sup> при энергии частиц 1 кэВ. ПИУ имеет равномерное распределение ускоренных частиц по сечению пучка. Несмотря на свои преимущества, ПИУ имеет и ряд недостатков: малый ресурс ионно-оптической системы; трудоемкость изготовления; малая надежность и сложность изготовления катодов; сложная система электропитания.

Существует достаточно много конструкций МРС, однако для эффективного распыления загрязнений с поверхности мишени применима так называемая распылительная пушка, при этом количество заряженных частиц, которые можно извлечь из плазмы источника, не превышает 0,05-0,5 мА/см<sup>2</sup> при энергии частиц 400 – 800 эВ. Однако в системах такого типа в процессе распыления начинают принимать участие (помимо рабочего газа) ионы генерируемого вещества (металл), то есть при определенных углах распыления они могут внедряться в поры и щели, в которых скапливаются газы и загрязнения, изменяя состав распыляемой поверхности. Так же МРС характерна малая скорость распыления, что не удовлетворяет поставленным технологическим задачам [5, 8, 12].

В настоящее время для нанесения жаростойких покрытий на лопатки ГТД в большинстве случаев используют системы дугового типа. Перед процессом напыления производят чистку в вакуумной камере источником дугового типа, при работе которого на поверхность детали поступают ионная, нейтральная и капельная фаза из дугового источника. При этом количество заряженных частиц, которые можно извлечь из плазмы дугового источника, не превышает 0,1 – 0,2 А/см<sup>2</sup> при энергии 1-2 кэВ.

В ускорителях с замкнутым дрейфом электронов энергия ионов достигает 1,5 кэВ при плотности потока ускоренных частиц 0,2 А/см<sup>2</sup>. Основными недостатками являются: поток ионов кольцевой формы; использование дорогостоящего и сложного в изготовлении катода-компенсатора; диэлектрические экраны, распыление которых вносит погрешности в компонентный состав покрытия.

Для УАС также характерны некоторые из недостатков УЗДП, а именно трубчатая форма ионного пучка и распыление катода. Однако для постав-

ленной технологической задачи в установке лопатки будут размещаться при помощи специальной оснастки (кассет) на позициях вращения вокруг горизонтальной оси, пересекая все области пучка. По сравнению с другими технологическими источниками у УАС есть ряд преимуществ: большой ресурс работы, простота конструкции и высокая надежность при эксплуатации.

### 3. Обоснование выбора параметров источника для очистки поверхностей

Выбор источника производим в соответствии с физическими и технико-термическими ограничениями, накладываемые на детали ГТД.

В соответствии с физическими ограничениями, исходя из предыстории поверхности, определяем виды загрязнений, которые физически и химически сорбированы на поверхности изделия.

Рассмотрим схему обработки поверхности изделия ускоренными ионами образом, представленную на рис. 1. В соответствии с ней процесс очистки условно делится на 2 этапа:

- I – сьем физически сорбированных частиц;
- II – сьем химически сорбированных частиц.

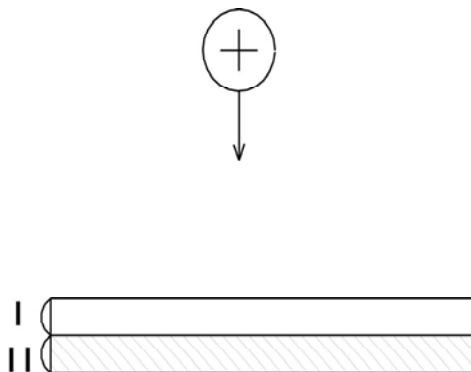


Рис. 1. Схема обработки поверхности изделия ускоренными ионами

На первом этапе происходит удаление физически- сорбированных частиц (загрязнений). Энергия связи физически сорбированных частиц не превышает 1 эВ.

На втором этапе происходит распыление поверхности (снятие дефектного слоя). Энергия взаимодействия лежит выше 1 эВ. На этом этапе убираются слабо связанные частицы, то есть происходит доочистка того, что не было удалено на первом этапе и удаление дефектного слоя, который возникает при различных видах обработки. Из литературных данных [11] известно, что величина дефектного слоя колеблется в пределах 10 – 20 атомных слоев, сле-

довательно, для получения атомно чистой поверхности их необходимо удалить.

Исходя из литературных данных известно, что энергия связи адсорбированных загрязнений с конструкционными сплавами Вt6 и Вt8 лежит в пределах 6 – 10 эВ (TiN – 8,3 эВ, TiC – 6,75 эВ, TiO – 9,78 эВ) [11].

После снятия загрязнений и активирования поверхности осаждается покрытие.

Для определения технико-термических ограничений рассмотрим схему взаимодействия частиц потока, представленную на рис. 2.

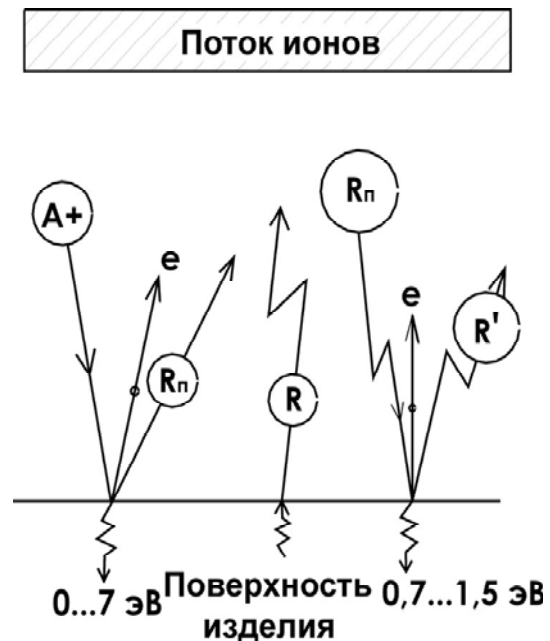


Рис. 2. Схема взаимодействия частиц потока, определяющего баланс энергии на поверхности детали: A<sup>+</sup> – ион аргона; e – электрон; R – излучение

Как было сказано выше, на начальной стадии высокоэнергетические ионы аргона распыляют адсорбированный слой примесей (физически сорбированные частицы). На следующем этапе распыляется некоторое число атомов металла детали (химически сорбированные частицы), количество которых зависит от соотношения масс атомов, углов падения и энергии бомбардирующих ионов.

Для решения задачи примем некоторые допущения: 1. Выбирается тепловой поток  $q$ , который учитывает все происходящие эффекты от среза сопла до поверхности детали и неравномерность плотности потока по сечению, связанную с особенностями генератора плазмы. 2. Лопатку будем рассматривать как плоскую пластину. 3. Принимаем, что лопатка поступила на участок чистая, то есть

присутствуют только физически сорбированные и хемосорбированные загрязнения, присущие данному типу материала. 4. Температура стенок технологического отсека постоянна. 5. При решении тепловой задачи предполагается, что сброс тепла осуществляется излучением. Сбросом тепла теплопроводностью можно пренебречь, так как, исходя из литературы [12], на нее приходится 3 – 5% теплового потока.

Для предотвращения изменения эксплуатационных свойств детали и её поверхности, необходимо чтобы температура материала не превышала температуры фазовых переходов, закалки и отжига. Исходя из поставленной технологической задачи, для титановых сплавов типа Вt6, Вt8 максимальной является температура неполного отжига, которая составляет 530 °С.

$$t_{\text{стац}} \leq t_{\text{фаз.переходов}} \quad (1)$$

Для качественной оценки теплового режима лопатку представим в виде бесконечно плоской пластины. Чтобы определить тепловой поток, который позволит обеспечить данные условия, необходимо решить задачу, связанную с распространением теплоты. На рис. 3 представлена схема распространения теплового потока в лопатке.

Уравнение теплопроводности для данного случая записывается следующим образом:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2)$$

Так как рассматривается стационарная задача, то уравнение принимает вид

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (3)$$

Уравнение необходимо дополнить граничными условиями исходя из постановки задачи для установившегося процесса: на границе  $W_1$  (задана из граничных условий I рода) температура постоянна и соответствует:

$$T|_{W_1} = T_{w_1} \quad (4)$$

На поверхности  $W_2$  задан радиационный тепловой поток (граничные условия III рода):

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{W_2} = \sigma \varepsilon \left( T^4 \Big|_{W_2} - T_{\text{окр.среды}}^4 \right), \quad (5)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала лопатки;

$T_{\text{окр.среды}}$  – условная температура окружающей среды.

Решение уравнения представляется в следующем виде:

$$T = c_1 x + c_2, \quad (6)$$

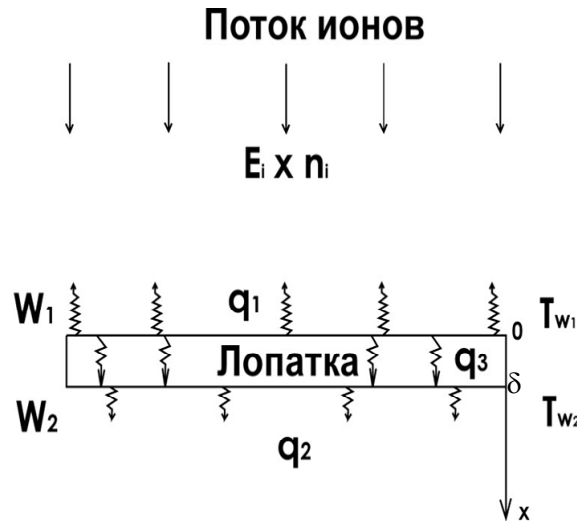


Рис. 3. Схема распространения теплового потока в лопатке:  $W_1, W_2$  – поверхности лопатки;  $q_1, q_2$  – тепловой поток, излучаемый с поверхности  $W_1$  и  $W_2$  соответственно;  $q_3$  – тепловой поток, проходящий через лопатку толщиной  $\delta$ ;  $T_{w_1}, T_{w_2}$  – температуры поверхностей  $W_1$  и  $W_2$  соответственно

где  $c_1, c_2$  – коэффициенты, которые определяются из граничных условий.

При  $x=0$

$$c_2 = T_{w_2}, \quad (7)$$

При  $x=\delta$   $c_1$  находим, решая систему 2 уравнений

$$c_1 = \frac{T_{w_1} - T_{w_2}}{\delta};$$

$$c_1 = \frac{\sigma \varepsilon (T_{w_2}^4 - T_{\text{окр.среды}}^4)}{-\lambda}, \quad (8)$$

где  $\delta$  – толщина лопатки в м;

$\varepsilon$  – относительная излучаемая способность или степень черноты тела;

$\sigma$  – коэффициент Стефана-Больцмана ( $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ ).

Для рассматриваемой детали запишем уравнение теплового баланса, приведенное к единице площади поверхности:

$$n_i \times E_i \leq q_1(T) + q_2(T) + q_3(T), \quad (9)$$

где  $q_1, q_2$  – тепловой поток, излучаемый с единицы поверхностей  $W_1$  и  $W_2$   $\left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$ ;

$q_3$  – тепловой поток, проходящий через лопатку толщиной  $\delta$ ,  $\left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$ .

$n_i$  – количество ионов, приходящихся на единицу поверхности в единицу времени  $\left[ \frac{\text{ион}}{\text{м}^2 \times \text{час}} \right]$ ;

$E_i$  – энергия ионов [Дж].

Тепловой поток, излучаемый с единицы площади, определяем по закону Стефана-Больцмана:

$$q_1 = \varepsilon \sigma \left( T_{w_1}^4 - T_{\text{окр.среды}}^4 \right). \quad (10)$$

$$q_2 = \varepsilon \sigma \left( T_{w_2}^4 - T_{\text{окр.среды}}^4 \right). \quad (11)$$

Уравнения (10) и (11) соответствуют излучению в бесконечное пространство с условной температурой  $T_{\text{окр.среды}} = 300\text{К}$ .

$$q_3 = \frac{\lambda(T_{w_1} - T_{w_2})}{\delta}. \quad (12)$$

Количество ионов будет равно

$$n_i = \frac{q_1 + q_2 + q_3}{E_i}. \quad (13)$$

Плотность потока ионов из определения равна

$$j = n_i \times e, \quad (14)$$

где  $e$  – заряд электрона ( $1,6022 \cdot 10^{-19}$  Кл).

Исходя из определения коэффициента распыления

$$S = n_a / n_i, \quad (15)$$

где  $n_a$  – количество частиц, распыленных с единицы поверхности в единицу времени.

В свою очередь, скорость распыления с единицы поверхности [8] будет равна

$$v = 3,75 \times 10^{28} \frac{SM}{N_a \rho} j, \quad (16)$$

где  $M$  – молярная масса материала;

$N_a$  – число Авогадро;

$\rho$  – плотность титана,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

Время проведения операции по очистке поверхности находим, исходя из зависимости

$$t = \frac{h}{v}, \quad (17)$$

где  $h$  – толщина атомных слоев, м.

Рассчитаем время проведения операции по очистке поверхности исходя из условий:  $T_{\text{окр.среды}} = 300\text{К}$ , для титановых сплавов в зависимости от состояния поверхности при температуре около 830 К  $\varepsilon$  составляет в среднем 0,25 а  $\lambda = 21,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ , а коэффициент распыления при энергии  $128,17 \cdot 10^{-18}$  (800 эВ) равен  $S = 0,08$  [5] (энергия ионов выбирается в соответствии с [8] из диапазона значений 400–800 эВ); где  $h = 66,8 \times 10^{-10}$  м.

Таким образом, в соответствии с (10), (11) и (12):

$$\begin{aligned} q_1 &= 0,25 \times 5,67 \times 10^{-8} \times (830^4 - 300^4) = \\ &= 46,65 \times 10^{10} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_2 &= 0,25 \times 5,67 \times 10^{-8} \times (835^4 - 300^4) = \\ &= 47,8 \times 10^{10} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \end{aligned}$$

$$q_3 = \frac{21,8 \times (830 - 300)}{0,03} = 0,4 \times 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Количество ионов в единицу времени определяем в соответствии с (11):

$$n_i = 7,37 \times 10^{27} \left( \frac{\text{ион}}{\text{м}^2} \right).$$

Рассчитанное количество ионов является суммарным, то есть  $n_i$  – количество ионов с энергией  $E_i = 128,17 \times 10^{-18}$  Дж, необходимых для съема 20 атомных слоев материала.

Исходя из [8], среднюю плотность тока, характерную данному типу ускорителя принимаем равной  $0,2 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$ . Тогда данному значению плотности тока будет соответствовать количество ионов  $1,25 \cdot 10^{18}$ .

Отсюда рассчитывается условно необходимое время очистки,  $t$  порядка 36 минут.

## Заключение

В работе были рассмотрены методы очистки лопаток газотурбинных двигателей, которые используются в промышленности перед осаждением покрытий. Выбран наиболее эффективный метод ионной очистки, в соответствии с поставленной технологической задачей. Проведен анализ существующих технологических источников для ионной очистки поверхностей изделий. Предложена расчетная модель процесса и методика выбора параметров технологического источника для ионной очистки поверхностей лопаток ГТД перед осаждением покрытий.

## Литература

1. Крымов В.В. Производство газотурбинных двигателей / В.В. Крымов, Ю.С. Елисеев, М.Ч. Зудин. – М.: Машиностроение - Полет, 2002. – 376 с., ил.
2. Изготовление деталей ГТД из титановых сплавов / В.А. Богуслаев, А.И. Долматов, П.Д. Жеманюк, А.Ф. Горбачев, В.С. Кривцов. – Запорожье: Дека, 1997. – 276 с., ил.
3. Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме / А.И. Костржицкий,

В.Ф. Карпов, М.П. Кабанченко и др. – М.: Машиностроение, 1991. – 176 с., ил.

4. Контроль процессов травления материалов в низкотемпературной газоразрядной плазме / Б.С. Данилин, В.Ю. Киреев, В.А. Каплин, Э.М. Врублевский // Приборы и техника эксперимента. – 1982. – №1. – С. 149.

5. Плешивец Н.В. Катодное распыление / Н.В. Плешивец. – Атомиздат, 1968. – 347 с.

6. Kaufman H.R. "Ion Source Design for Industrial Application" / H.R. Kaufman, R.S. Robinson // AIAA Journal. – 1982. – V.20, №6. – P. 745-760.

7. Слюсарь Д.В. Использование плазменного ионного ускорителя для обработки поверхностей / Д.В. Слюсарь, В.П. Колесник, О.В. Жорник // The 2nd Korea-Ukraine Gas Turbine Technology Symposium. – August 25-26, 2005. – P. 89-94.

8. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок / Б.С. Данилин. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 328 с.

9. Гришин С.Д. Электрические ракетные двигатели / С.Д. Гришин, Л.В. Лесков, Н.П. Козлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 272 с.

10. Ляпин Е.А. Современное состояние исследований ускорителей с анодным слоем / Е.А. Ляпин, А.В. Семенкин // Ионные инжекторы и плазменные ускорители. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – С. 20-33.

11. Каминский М. Атомные и ионные столкновения на поверхности металла: пер. с англ. / М. Каминский. – М.: Мир, 1967. – 508 с.

12. Ройх И.Л. Нанесение защитных покрытий в вакууме / И.Л. Ройх, Л.Н. Колтунова, С.Н. Федосов. – М.: Машиностроение, 1976. – 367 с.

Поступила в редакцию 21.11.2008

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф., ведущий научный сотрудник А.В. Бастеев, Институт проблем машиностроения им. А.М. Подгорного, Харьков.

#### ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ІОННОЇ ЧИСТКИ ПОВЕРХОНЬ ЛОПАТОК ГТД ПЕРЕД ОСАДЖЕННЯМ ПОКРИТТІВ

*А.О. Гарін*

У статті зроблений аналіз існуючих методів очищення лопаток газотурбінних двигунів, які використовуються в промисловості перед осадженням покриттів. Обрано найбільше ефективний метод іонного очищення, відповідно до поставленого технологічного завдання. Проведений аналіз застосування існуючих технологічних джерел для процесу іонного очищення інертним газом. Запропоновано розрахункову модель процесу й методику вибору параметрів технологічного джерела для іонного очищення поверхонь лопаток ГТД перед осадженням покриттів.

**Ключові слова:** методи очищення поверхні, покриття, очищення поверхні, автономне іонне джерело, прискорювач іонів, тепловий режим.

#### TECHNOLOGICAL SOURCE FOR IONIC CLEARING SURFACES BLADES OF GAS TURBINE ENGINES BEFORE SEDIMENTATION OF COVERINGS

*A.O. Garin*

The analysis of existing methods of clearing blades of gas turbine engines which are used in the industry before sedimentation of coverings is made. Processes of etching in discharge plasma are analysed. The most effective method of ionic clearing is chosen, according to the puted technological task. Comparison of existing technological sources for ionic clearing surfaces of products is carried out. The settlement model of process and a technique of a choice of parameters of a technological source for ionic clearing surfaces blades of gas turbine engines before sedimentation of coverings is offered.

**Key words:** Methods of clearing of a surface, covering, clearing of a surface, independent ionic source, the accelerator of ions, a thermal mode.

**Гарин Андрей Олегович** – аспирант факультета ракетно-космической техники, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.