

## **Оценка теплового состояния лопатки при очистке потоком ионов перед напылением**

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

Предложена методика оценки теплового состояния лопатки при очистке потоком ионов перед напылением на основе математического моделирования с учетом процессов, происходящих на её поверхности. Для решения данной задачи предлагается использовать численный эксперимент на основе решения нестационарного уравнения теплопроводности. Для задания формы участка поверхности, на который действует тепловой поток, предложено использовать аппарат R-функций, что позволило задать граничные условия в аналитическом виде. Результатами моделирования являются: распределение температур в обрабатываемой детали и количество распыленного ионным потоком материала. Предложенные модели могут быть использованы для оптимизации процесса ионной очистки.

**Ключевые слова:** ускоритель ионов, поток ионов, очистка поверхности, метод R-функции, тепловое состояние лопатки.

### **Введение**

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. Это вызвано следующими причинами: а) геометрические формы лопаток очень сложны и требуют высокой точности их изготовления; б) лопатки - самые массовые детали двигателя; в) материалы, из которых изготавливаются лопатки, как правило, труднообрабатываемые и дорогостоящие (специальные стали, титановые сплавы) [1].

На данный момент, актуальной проблемой при вакуумных видах напыления является то, что на поверхности лопатки даже при всех видах предварительной очистки могут присутствовать загрязнения и адсорбированные атомы (соединения), так как даже при самой тщательной очистке существует операция транспортировки от одного участка обработки к другому.

На современном этапе развития производства перед этапом напыления непосредственно в вакуумном отсеке производят очистку технологическими ускорителями ионов. Однако, до сих пор не существует методики, которая бы учитывала состояние поверхности лопатки при воздействии на неё потоком ионов [2, 3].

Таким образом, в статье представлена методика оценки температурного состояния лопатки при обработке потоком ионов на примере технологических источников УАС и ПИД с учетом их технологических параметров.

### **1. Постановка задачи**

Выбор модели производим в соответствии с физическими ограничениями, исходя из предыстории поверхности, определяем виды загрязнений, которые физически и химически сорбированы на поверхности изделия [4,5].

Рассмотрим схему обработки поверхности изделия ускоренными ионами образом, представленную на рис. 1.

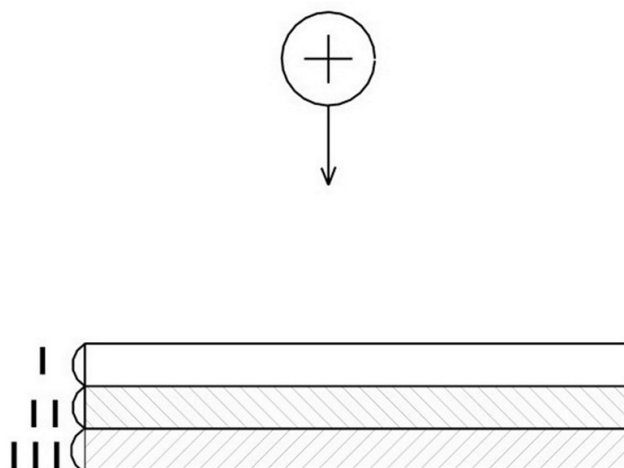


Рис. 1. Схема обработки поверхности изделия ускоренными ионами  
В соответствии с ней, процесс очистки условно делится на 3 этапа:

- I - сьем физически сорбированных частиц;
- II – сьем химически сорбированных частиц;
- III – удаление «дефектного слоя»

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 (третий этап), который возникает при различных видах обработки. Из литературных данных [6,7] известно, что величина дефектного слоя колеблется в пределах 10- 20 атомных слоев, следовательно, 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) [6, 7].

После снятия загрязнений и активирования поверхности осаждается покрытие.

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.

Целью моделирования является выбор режима ионной очистки с учетом ограничения на допустимую температуру нагрева материала. Для титановых сплавов типа ЖС, применяемых для изготовления лопаток, такой температурой является температура фазового перехода 1220°С.

Для решения задачи примем некоторые допущения:

1. При задании плотности теплового потока  $q$  учитывается неравномерность плотности ионного потока по сечению пучка, связанная с особенностями генератора плазмы.

2. Принимаем, что лопатка поступила на участок чистая, то есть присутствуют только физически сорбированные и хемосорбированные загрязнения, присущие данному типу материала.

3. Температура стенок технологического отсека постоянна, сброс тепла от детали осуществляется излучением. Сбросом тепла теплопроводностью можно пренебречь, так как, исходя из литературы [7, 8], на нее приходится 3-5% теплового потока.

4. При обработке, несмотря на то, что происходит снятие поверхностного слоя лопатки, степень черноты материала лопатки не меняется  $\varepsilon = const$ . Указанное предположение не имеет принципиального значения для процесса численного решения и связано с тем, что для обоснованного задания значения  $\varepsilon$  требуется проведение специальных экспериментов.

Уравнение теплопроводности в общем виде имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c \cdot \rho} = a \nabla^2 T, \quad (1)$$

где  $a$ ,  $m^2/c$  – коэффициент температуропроводности (характеризует скорость распространения тепла в теле)

$T$  – температура лопатки

$c$  – удельная теплоемкость материала лопатки

$\rho$  – плотность материала лопатки

$q_v$  ( $Вт/м^3$ ) - мощность, которая может появиться за счет действия внутренних источников теплоты, имеющих различную природу (например, джоулев нагрев).

На рисунке 2 показана расчетная схема тестовой задачи расчета поля температур при ионной очистке.

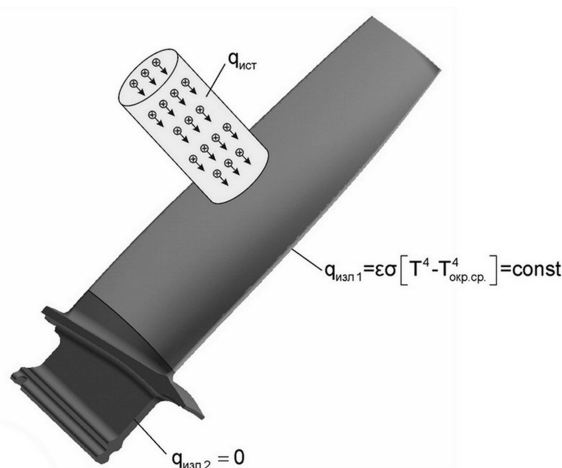


Рис. 2. Расчетная схема тестовой задачи расчета поля температур при ионной очистке

Будем выделять на поверхности обрабатываемой лопатки два участка: замок ( $\Omega_1$ ), служащий для закрепления, и перо - рабочую поверхность лопатки ( $\Omega_2$ ).

Для решения уравнения (1) приняты следующие граничные условия. Поверхность замка, исходя из того, что теплообмен теплопроводностью при ионной обработке незначителен, считаем адиабатической, т.е.:

$$q = 0, \quad (x, y, z, t) \in \Omega_1 \quad (2)$$

где  $q$  – тепловой поток, проходящий через поверхность.

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

$$n_i \times E_i \leq q(T)_{изл} + Q_{расп} + Q_{теплопровод}, (x, y, z, t) \in \Omega_2 \quad (3)$$

где  $n_i$  – 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];

$q_{изл}$  - тепловой поток, излучаемый с единицы поверхности лопатки  $\left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$ .

$Q_{теплопровод}$  - тепло, сбрасываемое теплопроводностью  $\left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$ .

Излучение от пера описывается законом Стефана-Больцмана:

$$q_{изл} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_{окр}^4), \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  - степень черноты обрабатываемой поверхности;  $\sigma$  - коэффициент Стефана-Больцмана;  $T$  – температура обрабатываемой поверхности;  $T_{окр}$  – температура окружающей среды.

Энергия распыления будет зависеть от граничной энергии при распылении и от количества распыленных частиц

$$Q_{расп} = n_{расп} \times E_i \quad (5)$$

Таким образом, для области  $\Omega_2$  краевая задача примет следующий вид:

$$q = \begin{cases} n_i \times E_i - k_{расп} \times n_i \times E_{связи} - q_{изл} & \text{в пятне} \\ q_{изл} & \text{вне пятна} \end{cases}$$

В дальнейшем, для формулировки краевой задачи расчета температур при ионной очистке необходимо определить способ задания функции-переключателя для определения факта нахождения точки поверхности в пятне ионного потока.

## 2. Определение участка поверхности лопатки, на которую воздействует поток

В условиях развития современной науки и техники возникает необходимость рассматривать все более сложные геометрические конфигурации полей, поэтому применять традиционные пути решения задач (интегральные преобразования, разделение переменных и т.д.) становится все труднее. Но, опираясь на алгебрологические методы и используя математический аппарат R-функций [9, 10] эти трудности можно преодолеть.

Метод R-функций позволяет перейти от формального алгебрологического описания геометрических объектов к построению их уравнений в обычном смысле этого слова.

При обработке лопатки устанавливаются в вертикальном положении на ос-

настке, вращающейся с угловой скоростью  $\omega_1$  (рис. 3). Сама обрабатываемая лопатка вращается вокруг собственной оси с угловой скоростью  $\omega_2$ . Поток ионов от источника для тепловой задачи будем рассматривать в виде цилиндра, при попадании внутрь которого на поверхности лопатки, обращенные к источнику, действует тепловой поток интенсивностью  $q$ . В общем случае  $q$  может являться функцией координат (т.е. существует известное распределение плотности потока) и времени (закон регулирования интенсивности источника).

Для обрабатываемых лопаток обычно известны координаты точек пера, которые задаются при помощи какой-либо процедуры аппроксимации. Это значит, что в системе координат лопатки  $(X_1, Y_1, Z_1)$  могут быть однозначно заданы координаты поверхностных узлов сетки конечных элементов. Тогда в системе координат установки  $(X, Y, Z)$  координаты этих точек можно записать в виде:

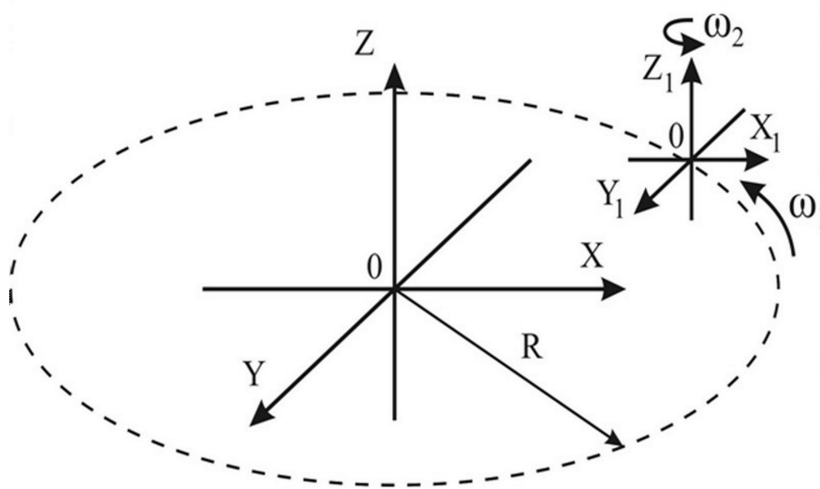


Рис. 3. Схема связи между системами координат лопатки и установки

$$\begin{cases} z = z_1 \\ x = x_1 \cos(-\omega_2 t) + y_1 \sin(-\omega_2 t) + R \cos(\omega_1 t), \\ y = -x_1 \sin(-\omega_2 t) + y_1 \cos(-\omega_2 t) + R \sin(\omega_1 t), \end{cases} \quad (6)$$

где  $R$  – радиус окружности, по которой производится установка лопаток на столе.

При выводе формулы (6) без потери общности принято, что в начальный момент времени ( $t=0$ ) начало системы координат лопатки находится в точке  $(R, 0, 0)$  оснастки.

Пусть поток от источника направлен перпендикулярно плоскости  $ZOX$ , смещен по оси  $Z$  от плоскости стола на расстояние  $h$  и имеет пятно радиуса  $r$  (рис. 4).

Тогда уравнение для описания области, занимаемой потоком вида

$$\Omega(x, y, z, t) = \begin{cases} > 0, \text{ внутри пятна,} \\ = 0, \text{ на границе,} \\ < 0, \text{ снаружи пятна} \end{cases}$$

запишется в виде:

$$\Omega = r^2 - x^2 - (z - h)^2 \quad (7)$$

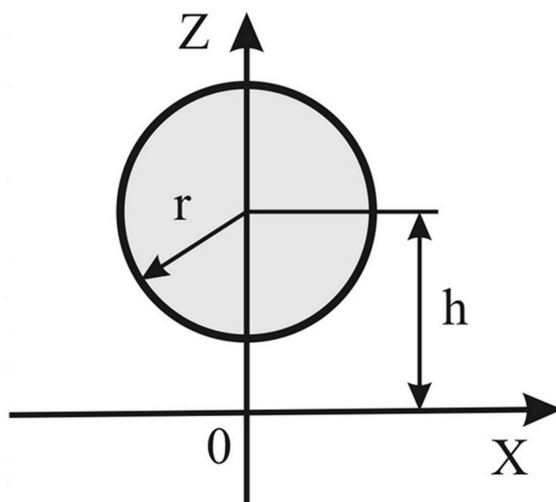


Рис. 4. К построению уравнения области, занимаемой источником

Для придания ему свойств «переключателя» применим функцию Хевисайда, обладающую следующими свойствами:

$$H(\Omega) = \begin{cases} 1 & \text{при } \Omega > 0 \\ 1/2 & \text{при } \Omega = 0 \\ 0 & \text{при } \Omega < 0 \end{cases}$$

Очевидно, что

$$F_1(x, y, z, t) = H\left(H(\Omega) - \frac{1}{4}\right) = H\left\{ \begin{array}{l} 3/4, \text{ внутри пятна} \\ 1/4, \text{ на границе} \\ -1/4, \text{ снаружи пятна} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} 1, \text{ внутри пятна} \\ 1, \text{ на границе} \\ 0, \text{ снаружи пятна} \end{array} \right\} \quad (8)$$

Для определения узлов сетки, в которых будет действовать тепловой поток такой прием нужно повторить еще дважды. Во-первых, при повороте оснастки лопатка дважды будет проходить область, описываемую уравнением (7). Для того, чтобы исключить тепловое воздействие при прохождении пятна в удаленной зоне и считая, что источник расположен в полупространстве, где значения координат  $y < 0$ , вторую функцию-переключатель запишем в виде:

$$F_2(x, y, z) = H(-y). \quad (9)$$

И, наконец, необходимо учесть, что воздействию теплового потока подвергается только та часть поверхности лопатки, которая обращена к источнику (рис.5). Условием, которое соответствует этому случаю, будет условие  $n_y > 0$ , где  $n_y$  – направляющий косинус к оси Y установки вектора нормали к поверхности лопатки.

С учетом того, что величины направляющих косинусов ( $n_{x1}$ ,  $n_{y1}$ ,  $n_{z1}$ ) по отношению к осям координат лопатки после построения сетки известны, и с учетом того, что лопатка в процессе вращения поворачивается относительно оси Y системы координат установки, для направляющего косинуса можно записать выражение:

$$n_y = \cos(\vec{n}, y) = \cos(\vec{n}, y_1 + \varphi) = n_{y1} \cos(\omega_2 t) - n_{x1} \sin(\omega_2 t) \quad (10)$$

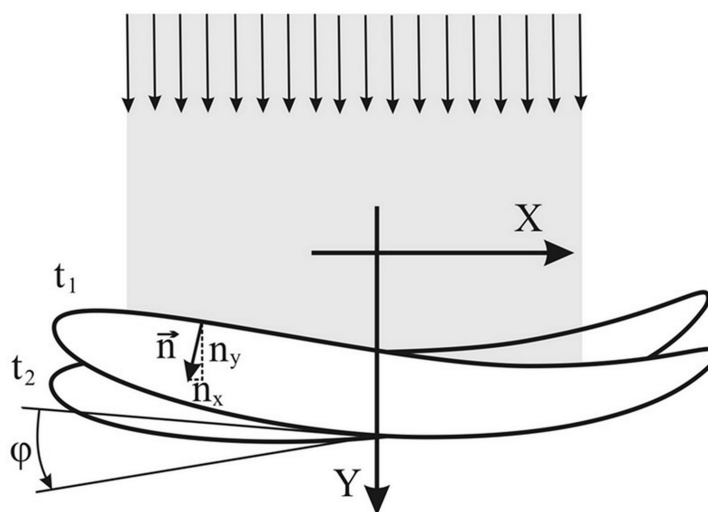


Рис. 5. Схема для определения участка воздействия теплового потока

Тогда третья функцию-переключатель запишется в виде:

$$F_3(x, y, z, t) = H\left(H(n_y) - \frac{1}{4}\right). \quad (11)$$

Общее выражение для определения участка воздействия теплового потока на перо получим перемножая построенные функции:

$$F(x, y, z, t) = F_1 \times F_2 \times F_3, \quad (12)$$

а функцию теплового потока на поверхности от действия потока ионов в виде:

$$Q = q(x, y, z, t) \times F(x, y, z, t) \times \cos(n, y). \quad (13)$$

### 3. Результаты исследования и обсуждение их результатов

Для дискретизации расчетной области использованы тетраэдры, октаэдры и призмы (рис. 6). Определены рациональные размеры конечных элементов из условия удовлетворения двум критериям – Aspect и Min angle. Первый критерий представляет собой отношение вписанной сферы к описанной вокруг элемента, а второй - минимальный угол, определяет качество на отдельных гранях элемента. Для CFD- расчетов приемлемы Aspect не ниже 0,3 и Min angle не менее 20°.

При моделировании визуально контролировался процесс прохождения лопатки через ионный пучок. При задании различных значений угловых скоростей вращения  $\omega_1$  и  $\omega_2$  контролировалось соответствие результатов численного моделирования и аналитически рассчитанного момента времени прохождения ионного пучка. Результаты во всех случаях моделирования были идентичными, что подтвердило адекватность методики задания граничных условия на основе уравнений (6-13).

В качестве примера на рис. 7 приведена картина распределения величины теплового потока по поверхности лопатки в один из моментов времени прохождения ионного пучка.

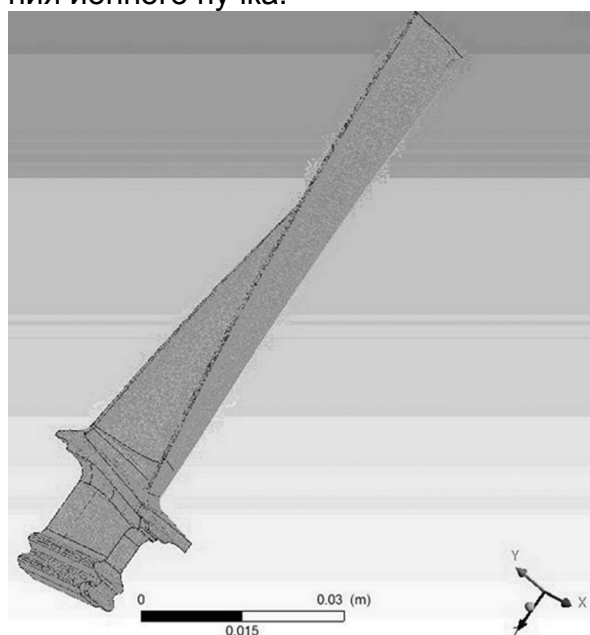


Рис. 6. Конечноэлементная модель лопатки

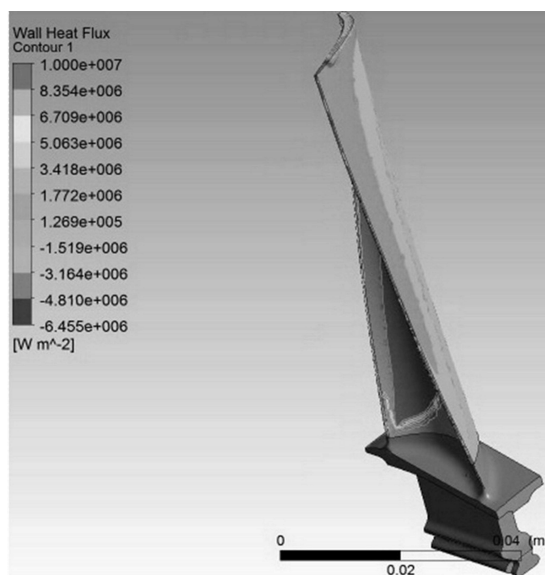


Рис. 7. Распределение теплового потока на лопатке при прохождении ионного пучка

При проведении численных экспериментов анализировалось изменение температуры в заданной точке лопатки, в качестве такой точки была выбрана точка с максимальным значением температуры. Типичная картина изменения температуры во времени для такой точки приведена на рис. 8.

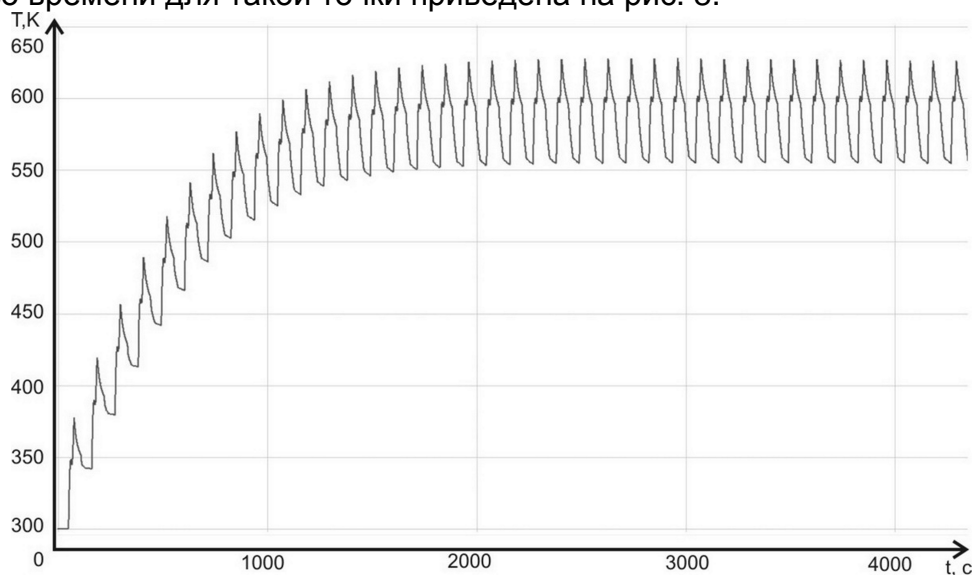


Рис. 8. Зависимость температуры нагрева на поверхности лопатки от времени обработки

Каждый пик увеличения температуры соответствует прохождению контрольной точки через ионный пучок. Для каждого значения скоростей вращения  $\omega_1$



и  $\omega_2$  и величины теплового потока после определенного количества циклов обработки лопатка переходит в квазистационарный тепловой режим, для которого выравнивается количество тепла, полученное при прохождении ионного пучка и количество тепла, сброшенное излучением при дальнейшем движении лопатки в камере.

Для случая, приведенного на рис.8, максимальная температура достигает 630 К, что соответствует техническим требованиям материала лопатки.

Разработанная математическая модель может быть использована для оптимизации режимов ионной очистки на основе проведения численных экспериментов с ограничением по максимальной температуре. Постановка такой задачи оптимального проектирования и результаты ее решения будут приведены в последующих работах.

### Заключение

1. Предложена методика оценки нестационарного теплового состояния лопатки при очистке потоком ионов с применением аппарата R-функция для аналитического задания граничных условий на изменяющемся во времени участке поверхности.

2. Для каждого из случаев обработки после определенного количества циклов лопатка переходит в квазистационарный тепловой режим, для которого выравнивается количество тепла, полученное при прохождении ионного пучка и количество тепла, сброшенное излучением при дальнейшем движении.

3. Направлением дальнейшего развития предложенного подхода является его применение для оптимизации технологических параметров процесса очистки потоком ионов.

### Список литературы

1. 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.
2. Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме / А.И. Кострицкий, В.Ф. Карпов, М.П. Кабанченко и др.- М.: Машиностроение, 1991. – 176 с., ил.
3. 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.
4. Плешивцев Н.В. Катодное распыление / Н. В. Плешивцев - Атомиздат, 1968.- 347 с.
5. Слюсарь Д.В. Использование плазменного ионного ускорителя для обработки поверхностей / Д.В. Слюсарь, В.П. Колесник, О.В. Жорник// The 2-nd Korea-Ukraine Gas Turbine Technology Symposium. - August 25-26, 2005.- P.89-94.
6. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок/ Б.С. Данилин – М.: Энергоатомиздат, 1989.- 328 с.
7. Каминский М. Атомные и ионные столкновения на поверхности металла: пер. с англ. / М. Каминский - М.: «Мир», 1967.- 508 с.
8. Ройх И.Л. Нанесение защитных покрытий в вакууме / И.Л. Ройх, Л.Н. Колтунова, С.Н. Федосов М.: Машиностроение, 1976.- 367 с.

9. Рвачев В.Л., Курпа Л.В. // R-функции в задачах теории пластин / К. :Наукова думка, 1987.

10.Рвачев В.Л., Слесаренко А.П. // Алгебро-логические и проекционные методы в задачах теплообмена / К. :Наукова думка, 1976.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., лауреат Государственной премии Украины  
А. И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г, Харьков

Поступила в редакцию 11.02.2011

### **Оцінка теплового стану лопатки при очищенні потоком іонів перед напиленням**

Запропоновано методику оцінки теплового стану лопатки при очищенні потоком іонів перед напиленням на основі математичного моделювання з урахуванням процесів, що відбуваються на її поверхні. Для вирішення цієї задачі пропонується використовувати числовий експеримент на основі роз'язання нестационарного рівняння теплопровідності. Для задання форми ділянки поверхні, на якій діє тепловий потік, запропоновано використовувати апарат R-функцій, що дозволило задати граничні умови в аналітичному вигляді. Результатами моделювання є: розподілення температур в оброблюваній деталі і кількість розпорошеного іонним потоком матеріалу. Запропоновані моделі можуть бути використані для оптимізації процесу іонної очищення.

**Ключові слова:** прискорювач іонів, потік іонів, очищення поверхні, метод R-функції, тепловий стан лопатки.

### **Evaluation of the thermal state of shoulder flushing the stream of ions before deposition**

A technique for estimating the thermal state of blades when cleaning the ion beam before deposition leniem based on mathematical modeling, taking into account processes occurring on its surface. To solve this problem are encouraged to use numerical simulation based on the solution of unsteady heat conduction equation. To set the shape of the surface area, the effect of heat flux, it is suggested to use the apparatus of R-functions, which allowed for is to give the boundary conditions in analytical form. Simulation results are: distribution of temperatures in the workpiece and the number of sputtered ion flux material. The proposed model can be used to optimize the ion cleaning.

**Keywords:** ion accelerator, a stream of ions, stonecrop surface, the method of R-functions, the thermal state of a blade.