

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ ПРИ ИХ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

© 2012 В.И. Богданович, В.А. Барвинок, В.Г. Небога, А.Н. Асмолов,
В.И. Фролов, М.Г. Гиорбелидзе

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 16.11.2012

Разработана математическая модель процесса нагрева и охлаждения тонкоплёночного полимера при циклическом нанесении на его поверхность вакуумного ионно-плазменного наноструктурного покрытия. Получены условия и разработаны рекомендации стабилизации температурного цикла напыления на изделия, расположенные на вращающемся технологическом приспособлении в вакуумной камере. Результаты работы использованы для разработки технологии получения тонкоплёночных гибких электронагревателей с наноструктурным резистивным слоем для системы активного терморегулирования бортовой аппаратурой космических аппаратов. Ключевые слова: наноструктурные покрытия, тонкоплёночный полимер, вакуумная ионно-плазменная металлизация, краевая задача нагрева и охлаждения, температурные циклы, оптимальная частота цикла

Вакуумные ионно-плазменные методы получения наноструктурных покрытий различного функционального назначения находят всё более широкое применение в современной технике на изделиях из металлов и неметаллов, в том числе из полимеров [1]. Так, в работах [2-5] изложены некоторые результаты по разработке новой технологии изготовления тонкоплёночных гибких малогабаритных электронагревателей с наноструктурным резистивным слоем для систем активного терморегулирования бортовой аппаратуры космических аппаратов. В этой технологии резистивный слой получают в виде наноструктурного полиметаллического покрытия, которое через специальные металлические маски наносится на тонкоплёночный (40...60 мкм) высокоинертный полимер вакуумным

электродуговым методом на установке ННВ-6.И1. Возникающая при этом необходимость получения металлических покрытий с общей толщиной 1...10 мкм для достижения заданного сопротивления резистивного слоя приводит к значительному разогреву полимерной плёнки, что в свою очередь требует разработки и оптимизации термического цикла наращивания покрытия для поддержания допустимого диапазона изменения температуры конденсации при максимальной производительности процесса.

В настоящей работе приведены некоторые результаты исследования условий получения оптимального цикла изменения температуры при циклическом нанесении покрытия на тонкоплёночный полимер.

В рассматриваемом технологическом процессе [2, 5] тонкоплёночный полимер располагается внутри металлического приспособления, состоящего из основания и маски с щелевыми отверстиями, через которые происходит осаждение покрытия и формируется заданный топологический образ резистивного слоя. Схема осаждения покрытия и схема поперечного сечения маски в области щелевого отверстия приведены на рис. 1.

В такой схеме напыления маска совершает вращательное движение в вакуумной камере с частотой вращения n за период вращения t_{Π} в течение времени $t_H = k_H \cdot t_{\Pi}$ находится в зоне напыления (рис. 1а), а в течение времени $t_{\text{охл}} = (1 - k_H) \cdot t_{\Pi}$ вне этой зоны, где $k_H = \alpha / 360^\circ\text{C}$, α – угловая ширина зоны напыления (рис. 1а). Некоторые параметры процесса наращивания покрытия приведены в табл. 1.

Богданович Валерий Иосифович, доктор технических наук, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.

E-mail: bogdanovich@ssau.ru

Барвинок Виталий Алексеевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: barvinok@ssau.ru

Небога Вадим Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, начальник производства ФГУП ГИП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс».

Асмолов Антон Николаевич, инженер НИИ технологий и проблем качества СГАУ

Фролов Василий Иванович, аспирант кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.

Гиорбелидзе Михаил Георгиевич, магистрант кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.

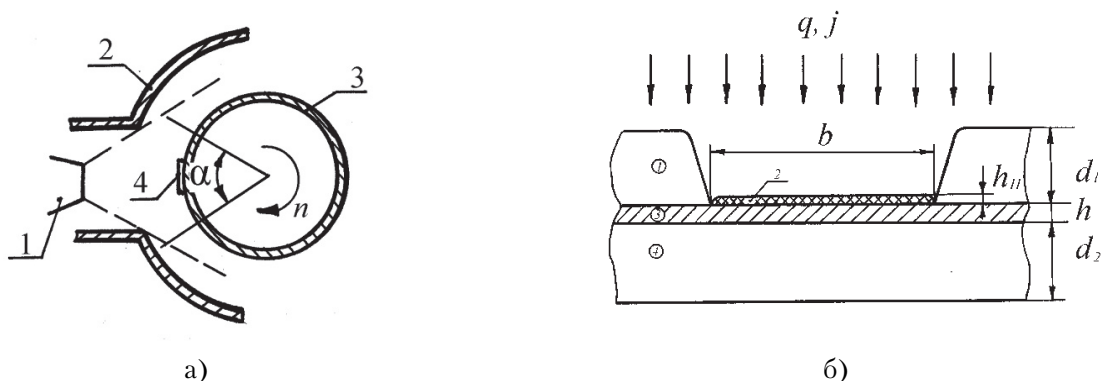


Рис. 1. Схема осаждения покрытия (а) и схема поперечного сечения маски в области щелевых отверстий (б)

На рис.1а: 1 – катод, 2 – стенки анода генератора и вакуумной камеры, 3 – вращающееся цилиндрическое приспособление для закрепления масок, 4- маски с полиимидной плёнкой.

На рис. 1б: 1– маска с щелевыми отверстиями, 2 – покрытие, 3 – полиимидная пленка, 4 – основание маски

Таблица 1. Некоторые параметры процесса наращивания покрытия на вращающейся полиимидной пленке

№	Материал покрытия	XH65MB					
1	Ток дуги, $I_{\text{д}}$, А	70			120		
2	$V_{\text{П}}$, мкм/мин	0,30			0,52		
3	$V_{\text{ср}}$, мкм/мин	0,058			0,100		
4	n , об/мин	2	7,5	12	2	7,5	12
5	Период вращения, $t_{\text{П}}$, с	30	8	5	30	8	5
6	t_n , с	5,8	1,6	0,97	5,8	1,6	0,97
7	$h_{01} = V_{\text{П}} \cdot t_n$, нм	29	8	4,8	50	14	8,4
8	$N(\text{об})$ для $h=5$ мкм	172	625	1042	100	357	595
9	$t(\text{мин})$ для $h=5$ мкм	86			50		

Примечание: $V_{\text{П}}$ – скорость роста покрытия на неподвижной детали; $V_{\text{ср}}$ – средняя скорость роста покрытия на вращающейся детали; t_n – время напыления за один оборот; h_{01} – толщина слоя наращиваемая за один оборот; N и t – полное число оборотов и время, необходимое для выращивания покрытия толщиной 5 мкм

При нахождении щелевого отверстия в зоне напыления на полимерной плёнке наращивается покрытие толщиной 5...50нм (табл.1) и, из-за действия теплового потока плазменной струи с плотностью q , плёнка с покрытием нагревается до некоторой температуры T_{0r} . При выходе щелевого отверстия из зоны напыления наращивание покрытия прекращается, величина q обращается в ноль и плёнка с покрытием из-за теплообмена с технологическими приспособлениями остывает до некоторой температуры $T_{\text{охл}}$. Задачей оптимизации термического цикла напыления является определение условий, при которых при каждом цикле напыления величины T_{0r} и $T_{\text{охл}}$ принимают постоянные значения и лежат в диапазоне между заданными минимальным $T_{M,1}$ и максимальным $T_{M,2}$ значениями температуры.

Для решения поставленной задачи найдём изменение температуры системы покрытие-плёнка за период совершения одного полного оборота приспособления в вакуумной камере.

Учитывая, что геометрические параметры сечения (рис.1б) удовлетворяют условиям $L \gg b \gg h \gg h_{\text{П,1}}$, задачу математического моделирования нагрева и охлаждения системы покрытие-полимер можно рассматривать как нагрев и охлаждение двухслойной пластины в одномерной постановке с координатой z по ее толщине.

В общем случае, задача математического моделирования процесса изменения температуры тонкой полиимидной пленки, расположенной в массивном технологическом приспособлении, при наращивании металлического покрытия

должна состоять из двух уравнений теплопроводности для пленки и наращиваемого металлического покрытия, граничного условия второго рода на наращиваемой поверхности, граничных условий четвертого рода на границе полимер-покрытие, граничного условия третьего рода на поверхности полимера, контактирующего с поверхностью технологического приспособления и начального условия.

Однако, учитывая, что за один цикл наращивания покрытия параметр Фурье тепловой задачи удовлетворяет условию

$$Fo_1 = a_1 t / h_{II}^2 (t) = a_1 / h_{II} \cdot V_{II} > 4,5 \cdot 10^7,$$

можно считать распределение температуры по сечению наращиваемого металлического покрытия постоянным и свести двухслойную задачу теплопроводности к однослойной задаче, решение которой не представляет значительных сложностей [6]. Вместе с тем, учитывая, что величина критерия Био в этой задаче значительно меньше единицы, а времена завершения цикла напыления и цикла охлаждения соответствуют параметру Фурье задачи, величиной значительно превышающей единицу, можно показать, что изменение температуры системы покрытие-полимерная плёнка с погрешностью не превышающей одного процента описывается приближёнными соотношениями на этапе нагрева и последующего охлаждения:

$$T_n(Fo) = T_0 + [(qh/\lambda Bi) - (T_0 - T_c)](1 - e^{-BiFo}), \quad (1)$$

$$T(Fo) = T_{01} - (T_{01} - T_c)(1 - e^{-BiFo}), \quad T_{01} = T_n(Fo_n), \quad (2)$$

где T_0 – начальная температура системы, $Bi = \alpha h / \lambda$ – критерий Био; $Fo = at/h^2$ – критерий Фурье; a , λ – коэффициенты теплопроводности и теплопроводности полимерной плёнки, h – её толщина, α и T_c – параметры теплообмена полимерной плёнки с технологическим приспособлением, которые должны определяться из экспериментальных данных.

Учитывая плотность теплового потока при данном виде напыления прямопропорциональна скорости наращивания покрытия $q = gV_{II}$ соотношениям (1) и (2) можно придать вид:

$$T_n(t) = T_0 + [A_1 V_{II} - (T_0 - T_c)](1 - e^{-A_2 t}), \quad (3)$$

$$T(t) = T_{01} - (T_{01} - T_c)(1 - e^{-A_2 t}), \quad T_{01} = T_n(t_n), \quad (4)$$

где $A_1 = g/\alpha$; $A_2 = \alpha \cdot a / \lambda h$.

Таким образом, в соответствии с рассматриваемой кинетической схемой технологическое приспособление с полиимидной пленкой движется по окружности в вакуумной камере и в момент времени $t=0$ с начальной температурой пленки T_0 попадает в зону действия плазменной струи. В момент времени $t = t_n = k_n t_{II}$ её выхода из этой зоны температура пленки примет значение (3):

$$T_n(t_n) = T_{01} = T_0 + [A_1 V_{II} - (T_0 - T_c)](1 - e^{-A_2 k_n t_{II}}). \quad (5)$$

При её дальнейшем вращении и завершении полного оборота и охлаждения в течение времени $t = t_{oxl} = (1 - k_n) t_{II}$ её температура в соответствии с (4) будет:

$$T(t_{oxl}) = T((1 - k_n) \cdot t_{II}) = T_{01} - (T_0 - T_c)(1 - e^{-A_2(1 - k_n)t_{II}}). \quad (6)$$

Подставляя (5) в (6) и проведя необходимые преобразования получим, что изменения температуры пленки от момента её входа в зону напыления до момента её входа в эту зону после совершения одного оборота вращения определяется соотношением:

$$T(t_{oxl}) - T_0 = e^{-A_2 t_{II}} [A_1 V_{II} (e^{A_2 k_n t_{II}} - 1) - (T_0 - T_c) \cdot (e^{A_2 t_{II}} - 1)]. \quad (7)$$

Аналогично, рассматривая некоторый $(i + 1)$ -ый оборот вращения получим, что в любом цикле вращения изменение температуры пленки от момента её входа в зону напыления $T(t_{oxl,i})$ до момента её входа в эту зону после совершения полного оборота $T(t_{oxl,i+1})$ будет

$$\Delta T_{oxl}(i+1, i) = T(t_{oxl,i+1}) - T(t_{oxl,i}) = e^{-A_2 t_{II}} \cdot [A_1 V_{II} (e^{A_2 k_n t_{II}} - 1) - (T(t_{oxl,i}) - T_c) \cdot (e^{A_2 t_{II}} - 1)], \quad (8)$$

где $i=0, 1, 2, \dots$; $T(t_{oxl,0}) = T_0$.

Из (7) видно, что в рассматриваемой схеме нанесения покрытия в зависимости от периода вращения t_{II} (или частоты вращения n) возможны три варианта изменения температуры пленки в момент её повторного входа в зону напыления:

$$T(t_{oxl}) = T_0; \quad T(t_{oxl}) > T_0; \quad T(t_{oxl}) < T_0. \quad (9)$$

В первом случае $T(t_{oxl}) = T_0$ из (8) видно, что с первого цикла вращения плёнка с постоянной температурой T_0 входит в зону напыления и постоянной температурой (5) выходит из этой зоны. Условием выполнения этого оптимального цикла напыления, будет условие, вытекающее из (7):

$$A_1 V_{II} (e^{A_2 k_n t_{II}} - 1) = (T_0 - T_c) \cdot (e^{A_2 t_{II}} - 1), \quad (10)$$

а также ограничение на температуру нагрева (5) после выхода из зоны напыления:

$$T_{n,2} > T_0 + [A_1 V_{II} - (T_0 - T_c)](1 - e^{-A_2 k_n t_{II}}). \quad (11)$$

Это соотношение (10) можно рассматривать как уравнение для нахождения оптимального значения $t_{II, onm}$ (или n_{onm}) в зависимости от трёх параметров

$$\Gamma_1 = \frac{A_1 V_{II}}{T_0 - T_c} = \frac{g V_{II}}{\alpha (T_0 - T_c)} = \frac{q}{\alpha (T_0 - T_c)}, \quad A_2 = \frac{\alpha \cdot a}{\lambda h}, \quad k_n. \quad (12)$$

Во втором случае условие $T(t_{oxl}) > T_0$ приводит к тому, что $\Delta T_{oxl}(i+1, i)$ в (8) больше нуля и $T(t_{oxl}, i)$ растёт с ростом i . Следовательно, наступит такой цикл вращения $i=s$, при котором убывающая положительная разность слагаемых в квадратных скобках (8) обратится в ноль. В результате при дальнейшем вращении температура пленки $T(t_{oxl,s})$ при её входе в зону напыле-

ния будет принимать постоянное значение, определяемое из (8) соотношением:

$$T(t_{\text{окл},s}) = T_c + A_1 V_{\Pi} (e^{A_2 k_n t_{\Pi}} - 1) / (e^{A_2 t_{\Pi}} - 1). \quad (13)$$

Видно, что этот случай реализуется при $t_{\Pi} < t_{\Pi, \text{онм}}$ (или $n > n_{\text{онм}}$).

Используя (5), легко показать, что при выходе из зоны напыления в каждом последующем цикле температура полимера будет принимать также постоянное значение, определяемое соотношением:

$$T(t_{\text{окл},s} + t_n) = T_c + A_1 V_{\Pi} (1 - e^{-A_2 k_n t_{\Pi}}) / (1 - e^{-A_2 t_{\Pi}}). \quad (14)$$

В третьем случае $T(t_{\text{окл}}) < T_0$ снижение температуры плёнки в момент её входа в зону напыления приводит к тому, что $\Delta T_{\text{окл}}(i+1, i)$ в (8) меньше нуля и $T(t_{\text{окл}}, i)$ убывает с ростом i . Следовательно, наступит такой цикл вращения $i=s$, при котором убывающая по абсолютной величине отрицательная разность слагаемых в квадратных скобках (8) обратится в ноль. В результате при дальнейшем вращении температура плёнки $T(t_{\text{окл},s})$ при её входе в зону напыления также будет принимать постоянное значение, определяемое тем же соотношением (13), а при выходе из зоны напыления её температура будет определяться соотношением (14). Видно, что этот случай реализуется при $t_{\Pi} > t_{\Pi, \text{онм}}$ (или $n < n_{\text{онм}}$).

Таким образом, при циклическом напылении на вращающееся изделие может существовать оптимальная частота вращения $n_{\text{онм}}$, при которой изменение температуры плёнки с первого цикла вращения изменяется в пределах от T_0 до $T_n(t_n) < T_{m,2}$. Эта оптимальная частота определяется условиями (10) и (11) и зависит от трёх обобщённых параметров режима (12). При выборе значения частоты вращения больше или меньше оптимальной через некоторое число циклов вращения также наступит режим, при котором температура плёнки будет также в каждом цикле вращения изменяться в постоянных пределах от $T(t_{\text{окл},s})$ (13) до $T(t_{\text{окл},s} + t_n)$ (14) и если эти пределы удовлетворяют условиям

$$T_{m,1} < T_n(t_{\text{окл},s}), T(t_{\text{окл},s} + t_n) < T_{m,2}, \quad (15)$$

то и эти режимы можно использовать для нанесения покрытия.

Определим оптимальную частоту вращения $n_{\text{онм}}$.

Анализ (10) показывает, что решение этого уравнения существует только при выполнении определенного соотношения между параметрами (12). Действительно, один корень уравнения имеет тривиальное значение $t_{\Pi} = 0$. Поэтому нетривиальный корень решения $t_{\Pi} > 0$ будет существовать только в том случае, когда график левой части уравнения (10) с $k_n < 1$ располагается выше графика правой части этого соотношения, что приведёт к их пересечению во второй точке с

$t_{\Pi} > 0$. Следовательно, производная левой части соотношения (10) по t_n в точке $t_{\Pi} = 0$ должна быть больше производной правой части этого соотношения в той же точке, то есть:

$$\Gamma_1 k_n = \frac{A_1 V_{\Pi} k_n}{T_0 - T_c} = \frac{q k_n}{\alpha(T_0 - T_c)} > 1. \quad (16)$$

В частности из этого соотношения вытекает, что если период вращения t_{Π} удовлетворяет условию $A_2 t_{\Pi} \ll 1$, то не существует решения уравнения (10). Действительно, используя условие $A_2 t_{\Pi} \ll 1$, получим $\Gamma_1 k_n = 1$, что противоречит (16). Приведенный пример показывает, что часто используемый в технологии, казалось бы очевидный, экспериментальный подход определения оптимального цикла изменения температуры изделия при импульсных мощных тепловых потоках за счет выбора больших оборотов вращения изделия (малые значения t_{Π}) не даст желательного результата без учета соотношения (16).

Полученные результаты использованы для стабилизации термического цикла получения наноструктурного покрытия из материала ХН65МВ на полиимидной плёнке толщиной $h = 60$ мкм. Из предварительных экспериментальных исследований было получено, что плотность теплового потока плазменной струи связана со скоростью конденсации покрытия соотношением $q = 6,8 \cdot 10^3 \cdot V_{\Pi}$ (в данном соотношении V_{Π} измеряется в мкм/мин), параметры теплообмена для данных условий напыления составляют $\alpha = (11,3 \pm 0,2)$ Вт/м²К и $T_c = (38 \pm 5)^{\circ}\text{C}$, а границы диапазона температур для получения качественного покрытия на полиимидной плёнке должны составлять $T_{m,1} = T_0 = 80^{\circ}\text{C}$ и $T_{m,2} = 160^{\circ}\text{C}$.

На рис. 2 приведен график корней уравнения (10) в зависимости от параметра Γ_1 при $A_2 = 0,107$ и $k_n = 0,194$. Этот график периода вращения $t_{\Pi, \text{онм}}$ или частоты вращения $n_{\text{онм}}$ даёт значения этих параметров при оптимальном цикле изменения температуры полиимидной пленки для выбранных значений параметров Γ_1 , A_2 и k_n . Например, для технологического режима при скорости нанесения покрытия $V_{\Pi} = 0,5$ мкм/мин значение параметра Γ_1 составляет $\Gamma_1 = 7,33$, что даёт период вращения $t_{\Pi, \text{онм}} = 7,6$ с и частоту вращения $n_{\text{онм}} = 7,9$ об/мин. Используя эти данные, проверяем выполнение условия (11) $T_n(t_n) = T_0 + [A_1 V_{\Pi} - (T_0 - T_c)](1 - e^{-A_2 k_n t_{\Pi, \text{онм}}}) = 120^{\circ}\text{C} < T_{m,2}$.

Так как это условие выполняется, то для режима напыления материала ХН65МВ на токе дуги 120А при скорости напыления $V_{\Pi} = 0,5$ мкм/мин на полиимидную пленку в разработанном технологическом приспособлении следует установить частоту вращения $n_{\text{онм}} = 7,9$ об/мин при условии начального подогрева пленки до $T_0 = 80^{\circ}\text{C}$. При этом за один оборот приспособле-

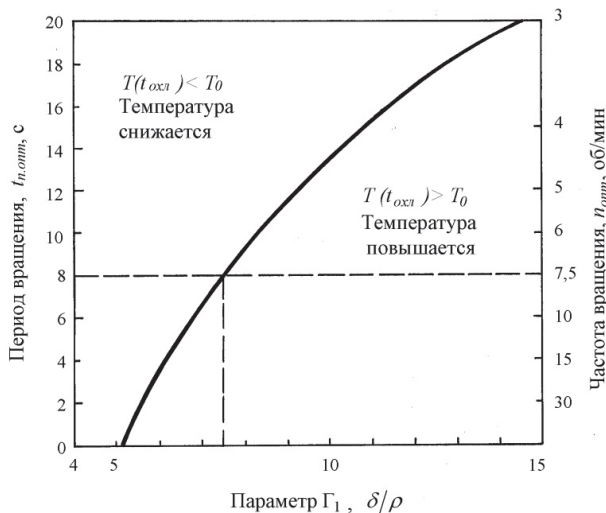


Рис. 2. Период t_{rot} и частота вращения n_{rot} при оптимальном цикле изменения температуры полиимидной пленки в зависимости от параметра $\Gamma_1 = q/\alpha(T_0 - T_c)$ при $k_n=0,194$ и $A_2=0,107$

ния будет наращиваться слой толщиной около $0,013 \text{ мкм} = 13 \text{ нм}$ и для получения слоя общей толщиной, например, 5 мкм должно быть совершено примерно 385 оборотов или общее время нанесения покрытия должно составить около 52 мин.

Отметим, что если при напылении будет установлена частота вращения $n > n_{\text{opt}}$, то будет реализована ситуация, определяемая вторым условием (9) и температура пленки по мере её вращения будет от оборота к обороту повышаться пока не примет значение (13), если же будет установлена частота вращения $n < n_{\text{opt}}$, то будет выполняться третье условие (9) и температура пленки будет по мере её вращения понижаться до тех пор пока не достигнет значения (9). Установленная закономерность позволяет предложить очень эффективный приём управления термическим циклом нанесения покрытия на вращающиеся изделия. Если в процессе нанесения покрытия оптической системой регистрации температуры устанавливается, что от оборота к обороту температура изделия повышается, то для её уменьшения необходимо уменьшить частоту вращения, если же понижается, то увеличить частоту вращения. Причём это необходимое изменение частоты может быть подобрано экспериментально несколькими этапами её изменения, либо рассчитано по приведенным соотношениям.

Численный анализ допусков на точность определения величины n_{opt} в зависимости от точности определения параметров (12) по условиям (15) показывает, что рассматриваемый режим напыления с изменением температуры плёнки в

пределах от $60 \text{ }^\circ\text{C}$ до $160 \text{ }^\circ\text{C}$ обеспечивается при рассеивании параметров режима в пределах не более 20%. Следовательно, разработанная схема циклического напыления изделий, расположенных на вращающемся цилиндрическом технологическом приспособлении является устойчивой к рассеиванию параметров режима напыления.

Таким образом, проведенные исследования позволили разработать адекватное теоретическое описание изменения температуры полиимидной пленки в процессе нанесения покрытия и её охлаждения в вакуумной камере, адаптировать эти результаты к конкретной технологической ситуации нанесения покрытия на изделия, расположенные на цилиндрическом технологическом приспособлении, вращающемся вместе с каруселью вакуумной камеры, получить исходные соотношения для определения частоты вращения, при которой реализуется оптимальный цикл изменения температуры полиимидной пленки в таком процессе нанесения покрытия и предложить эффективный приём управления температурным циклом за счет изменения скорости вращения.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.V37.21.0072 «Получение нового вида высокоомных материалов в виде наноструктурных полиметаллических покрытий на тонкоплёночных полимерах для изготовления высокоэффективных малогабаритных электронагревателей систем терморегулирования космических аппаратов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барвинок В.А., Богданович В.И. Физические основы и математическое моделирование процессов вакуумного ионно-плазменного напыления. М.: Машиностроение, 1999. 309 с.
2. Барвинок В.А., Богданович В.И., Молчанов В.С., Небога В.Г. Тонкоплёночные электронагреватели с наноструктурным резистивным слоем для терморегулирования бортовой аппаратуры космических аппаратов // Международный форум по нанотехнологиям, 3-5.12.08. 2008. Т.2. С. 372-373.
3. Патент 2379857 РФ, МПК H05B3/18. Тонкоплёночный гибкий электронагреватель / Богданович В.И., Барвинок В.А., Асмолов А.Н., Небога В.Г., Молчанов В.С., Китаев А.И., Закопянская О.С./ № 2008144715/09, заявлено 12.11.2008; Опубл. 20.01.2010; Бюл. № 2. 7 с.
4. Богданович В.И., Барвинок В.А., Кирилин А.Н., Небога В.Г., Китаев А.И., Молчанов В.С. Тонкоплёночные электронагреватели с наноструктурным резистивным слоем // Проблемы машиностроения и автоматизации – 2010. №3. С. 111-117.
5. Богданович В.И., Небога В.Г., Асмолов А.Н., Гришинов В.Н. Теоретическое и экспериментальное исследова-

ние теплового функционирования тонкопленочных
электронагревателей системы терморегулирования
космических аппаратов // Проблемы машинострое-

ния и автоматизации. 2012. №3. С.111-117.
6. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. М.: Высшая
школа, 1966. 600 с.

MATHEMATICAL MODELING OF HEATING OF THIN-FILM POLYMER AT THEIR CYCLIC ION-PLASMA METALLIZER

© 2012 V.I. Bogdanovich, V.A. Barvinok, V.G. Neboga, A.N. Asmolov,
V.I. Frolov, M.G. Giorbelidze

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolev
(National Research University)

A mathematical model of the process of heating and cooling of the thin film of the polymer under cyclic applied to the surface of the vacuum ion-plasma nanostructured coatings. Conditions are obtained and recommendations stabilize temperature cycle deposition to products placed on the rotating technological devices in a vacuum chamber. The results of the work are used for the development of flexible thin-film technology for electric heaters with nanostructure resistive layer for active thermal control systems on-board equipment of spacecraft.

Keywords: nanostructured coatings, thin film polymer, vacuum ion-plasma metallization, the boundary value problem of heating and cooling, thermal cycling, the optimal frequency of the cycle

Valery Bogdanovich, Doctor of Technics, Professor at the Air And Space Craft Manufacture and Quality Management in Engineering Department. E-mail: bogdanovich@ssau.ru

Vitaly Barvinok, Corresponding Member of the RAS, Doctor of Technics, Professor, Head at the Air And Space Craft Manufacture and Quality Management in Engineering Department. E-mail: barvinok@ssau.ru

Vadim Neboga, Candidate of Technics, Associate Professor at the Air And Space Craft Manufacture and Quality Management in Engineering Department, Chief of Manufacture at the FSUE SRP SRC "TsSKB-Progress".

Anton Asmolov, Engineer at the Research Institute of Technology and Quality Problems, SSAU

Vasily Frolov, Graduate Student at the Air And Space Craft Manufacture and Quality Management in Engineering Department.

Michael Giorbelidze, Student at the Air And Space Craft Manufacture and Quality Management in Engineering