

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛИ С НАНОСТРУКТУРНЫМ РЕЗИСТИВНЫМ СЛОЕМ

Изложены результаты исследования удельного электрического сопротивления наноструктурных покрытий из ряда сплавов и металлов, полученных конденсацией вакуумных ионно-плазменных потоков на полиимидных плёнках. Уточнена методика определения этого параметра с учётом шероховатости реальных покрытий. Показано, что удельное электрическое сопротивление таких покрытий в (3-8) раз превышает удельное электрическое сопротивление материала покрытия, но в состоянии металлургической поставки. Проведённые исследования позволили разработать технологию изготовления тонкоплёночных электронагревателей для системы терморегулирования бортовой аппаратуры космических аппаратов.

Ключевые слова: тонкоплёночный электронагреватель, резистивный слой, вакуумные ионно-плазменные покрытия, удельное электрическое сопротивление.

При решении прикладных задач проведения высокоточных измерений и обработки информации в космическом и околоземном пространстве требуется долговременная эффективная работа специальных систем терморегулирования бортовой аппаратуры космических аппаратов [1]. Разработка некоторых видов таких систем терморегулирования потребовала создания технологии изготовления высоконадёжных гибких малогабаритных (30×100 мм, 30×200 мм) электронагревателей с потребляемой электрической мощностью в пределах 2-15 Вт, рабочим напряжением до 30 В, температурой нагрева до 50-150°C и гарантированным ресурсом работы не менее 50 тыс. часов в условиях открытого космического пространства.

Анализ существующих технологий изготовления электронагревателей показал, что их изготовление размещением и креплением на изолирующей основе резистивного слоя в виде металлической проволоки или фольги приводит к низкой технологичности, а для ряда видов нагревателей к принципиальной нереализуемости процесса их изготовления из-за необходимости размещения и крепления резистивного элемента большой длины и тонкого сечения в заданных небольших габаритах. Кроме того, электронагреватели, изготовленные по такой технологии обладают недостаточной технологичностью при сборке космического аппарата и невысокой надёжностью при их эксплуатации.

В связи с этим был разработан принципиально новый [2-4] для технологии машиностроения способ изготовления тонкоплёночных гибких электронагревателей (ПЭН), основанный на создании резистивного слоя нанесением вакуумного ионно-плазменного наноструктурного покрытия толщиной в пределах 1-10 мкм на высокоинертную полиимидную плёнку толщиной 40-60 мкм с последующей герметизацией резистивного слоя приклеиванием внешнего слоя такой же плёнки. Топологический образ заданной геометрии резистивного слоя формировался нанесением покрытия через специальные маски, а припайка токо-

проводящих проводов проводилась через медное покрытие, напыляемое в заданных местах резистивного слоя.

Формирование резистивного слоя на диэлектрическом материале различными методами нанесения покрытий достаточно хорошо известная технология микроэлектроники, широко применяемая для получения тонкоплёночных дискретных резисторов с габаритными размерами менее 100-200 мкм [5]. Однако, в связи с использованием в нашем случае резистивного слоя в качестве нагревательного элемента, с существенным увеличением габаритных размеров по сравнению с резисторами микросхем, требованиями по монтажу ПЭНов на сложнопрофилированных панелях системы терморегулирования и более жесткими условиями их эксплуатации разработанная технология изготовления ПЭНов существенно отличается от известных технологий применяемых в микроэлектронике.

Выбор некоторых технологических решений, принятых при разработке технологии изготовления ПЭНов, определялся следующими соображениями. Требования к необходимости монтажа ПЭНов на сложнопрофилированных поверхностях привели к выбору тонкоплёночных полимерных материалов в качестве основы для нанесения резистивного слоя. Требования к эксплуатационным характеристикам ПЭНов и возможности их длительного применения в условиях открытого космического пространства привели к выбору в качестве такого полимера высокоинертной полиимидной плёнки ПМ ТУ 6-19-121-85 толщиной 40-60 мкм с допустимой температурой эксплуатации 220°C, высокими механическими свойствами (разрушающее напряжение при растяжении не менее 117 МПа и предельное относительное удлинение не менее 40%), с рациональной стойкостью не менее 300 мрад и возможностью ее склеивания под давлением при температуре 170°C плёночным клеем ПКС ТУ 6-06-20-88.

В свою очередь высокая химическая инертность полиимида привела к выбору вакуумного ионно-плазменного метода [2] осаждения рези-

стивного слоя из ускоренного плазменного потока металла для обеспечения высокой адгезии покрытия к полимеру, обеспечения термовыносливости системы при многократном ее нагреве и охлаждении при эксплуатации, а также для обеспечения стойкости системы при перемещениях на промежуточных технологических операциях и при припайке токоподводящих проводов к резистивному слою через медное покрытие.

Анализ расчетных вариантов обеспечения заданных электрических и тепловых параметров ПЭНов в пределах заданных габаритов их размеров показал, что материал резистивного слоя при его толщине 3-10 мкм должен обладать удельным электрическим сопротивлением в диапазоне 2-10 Ом·мкм. Однако известно [5], что удельное электрическое сопротивление чистых металлов, используемых для нагревательных элементов, в 50-100 раз меньше требуемых значений, специальных сплавов (типа нихром и др.) близко к нижней границе указанного интервала, а соединений типа окислов и нитридов значительно больше верхней границы этого интервала. В связи с этим был проведен значительный комплекс исследований по выбору материала и технологии его нанесения для получения удельного электрического сопротивления резистивного слоя с величиной более 2 Ом·мкм.

Исследованию электропроводности покрытий из чистых металлов и сплавов посвящено достаточно большое число научных публикаций, результаты которых проанализированы в монографиях [5-9]. В этих работах в основном изучались чистые металлы и тонкие покрытия с целью установления различных механизмов электропроводности и рассеивания электронов проводимости, анализа размерных эффектов и их влияния на электроперенос при сверхнизких температурах и воздействии магнитных полей. Приведены результаты влияния различных дефектов структуры, в том числе внешних границ и границ субмикронных и наноструктурных кристаллитов, на электропроводность. Показано, что при переходе от чистых металлов к их сплавам, а в ряде сплавов при переходе от упорядоченной структуры к неупорядоченной величина их электропроводности значительно убывает [9]. Электропроводность значительно убывает при введении в покрытие легирующих металлических и газовых элементов [5, 9], а также убывает при уменьшении размеров структурных кристаллитов покрытия менее 0,1 мкм и особенно значительно в области размеров кристаллитов менее 0,05-0,01 мкм [6].

Среди исследованных резистивных материалов наиболее перспективным для вакуумного ионно-плазменного осаждения является нихром. Однако, из-за его недостаточно высокого удельного электрического сопротивления в состоянии

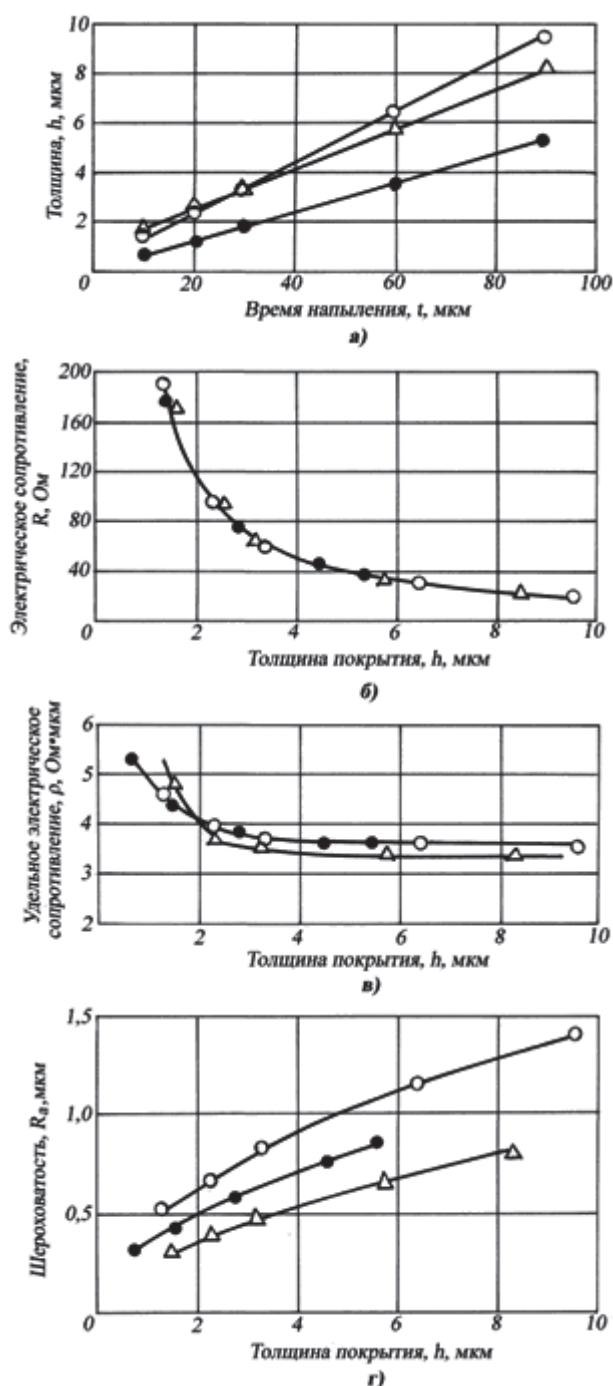


Рис. 1. Толщина (а), электрическое сопротивление (б), удельное электрическое сопротивление (в) и шероховатость поверхности R_a покрытий из материала ХН65МВ (Δ) и 12Х18Н10Т (\circ ; \bullet) в зависимости от времени напыления (а) и толщины покрытия (б, в, г) для тока дуги 75А (\bullet) и 120А (\circ ; Δ)

металлургической поставки (0,8-1,2 Ом·мкм) в качестве напыляемого материала был выбран один из вариантов хромоникелевого сплава ХН65МВ, близкий по составу к нихрому, но дополнительно легированный молибденом и вольфрамом. Надо отметить, что в указанных публикациях отсутствуют данные об электропроводности покрытий толщиной 1-10 мкм из хромоникелевых сплавов, нержавеющей сталей

Таблица

Средние значения толщины h , электрического сопротивления R , удельного электрического сопротивления ρ , параметра шероховатости поверхности R_a покрытий из хромоникелевых сплавов (ХН65МВ, Х20Н55), нержавеющей стали (12Х18Н10Т) и титана (ВТ-1-00) в зависимости от времени напыления t на одинаковом режиме напыления

Материал	t , мин	h , мкм	R , Ом	ρ , Ом•мкм	ρ_m , Ом•мкм	R_a , мкм	R_a/h
ХН65МВ	10	1,6	175	4,85	0,95	0,32	0,20
	20	2,4	88	3,60		0,40	0,17
	30	3,3	63	3,49		0,49	0,15
	60	5,8	35	3,45		0,65	0,11
	90	8,4	24	3,41		0,81	0,10
Х20Н55	10	1,2	263	5,35	0,91	0,25	0,21
	20	2,0	110	3,82		0,34	0,17
	30	2,9	77	3,75		0,47	0,16
	60	5,5	39	3,61		0,60	0,11
	90	7,8	27	3,58		0,69	0,09
12Х18Н10Т	10	1,4	192	4,52	0,75	0,51	0,36
	20	2,4	98	3,95		0,67	0,28
	30	3,4	64	3,71		0,82	0,24
	60	6,4	34	3,61		1,15	0,18
	90	9,6	22	3,55		1,42	0,15
ВТ-1-00	10	1,1	184	3,48	0,42	0,27	0,25
	20	1,9	80	2,55		0,36	0,19
	30	2,6	57	2,49		0,43	0,17
	60	5,0	29	2,47		0,63	0,13
	90	7,3	20	2,45		0,78	0,11

Примечание: ρ_m – удельное электрическое сопротивление материала покрытия в состоянии металлургической поставки, шероховатость полиимидной основы $R_{a,0}=0,12$ мкм

и чистых металлов, полученных конденсацией плазменных потоков металлов в вакууме на полимерных пленках.

В связи с этим в настоящей работе приведены некоторые результаты исследований резистивных свойств наноструктурных покрытий ряда металлов и сплавов, полученных конденсацией плазменных потоков в вакууме на полиимидной пленке, позволившие обосновать технологические решения, принятые при создании тонкопленочных электронагревателей специального назначения.

Покрытия наносились на модернизированной установке ННВ-6.6И1 с электродуговой генерацией металлической плазмы из катодов, материал которых определял состав получаемого покрытия. Конденсация металлической плазмы на полиимидной пленке проводилась через металлическую маску, обеспечивающую получение резистивного слоя длиной 236 мм и шириной 4 мм, в атмосфере аргона, аргона и кислорода

и в атмосфере при остаточном давлении вакуумной камеры $(1-3) \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. Структура покрытия создавалась в виде слоистой 2D наноструктуры за счет периодического перемещения образца через зону воздействия плазменного потока напыляемого материала.

На рисунке 1 приведены типовые результаты измерения толщины покрытия, электрического сопротивления резистивного слоя R , удельного электрического сопротивления ρ и параметра шероховатости поверхности R_a покрытий из хромоникелевого сплава ХН65МВ и нержавеющей стали 12Х18Н10Т на одном из вариантов режима получения наноструктурного покрытия с размером структурного зерна в пределах (0,06-0,15) мкм. Результаты измерения этих параметров для материалов ХН65МВ, Х20Н55, 12Х18Н10Т и ВТ-1-00 для режима напыления, представленного на рис. 1 при токе дуги 120 А, приведены в таблице.

Внешний вид поверхности покрытия из ХН65МВ толщиной 5,8 мкм и распределение не-

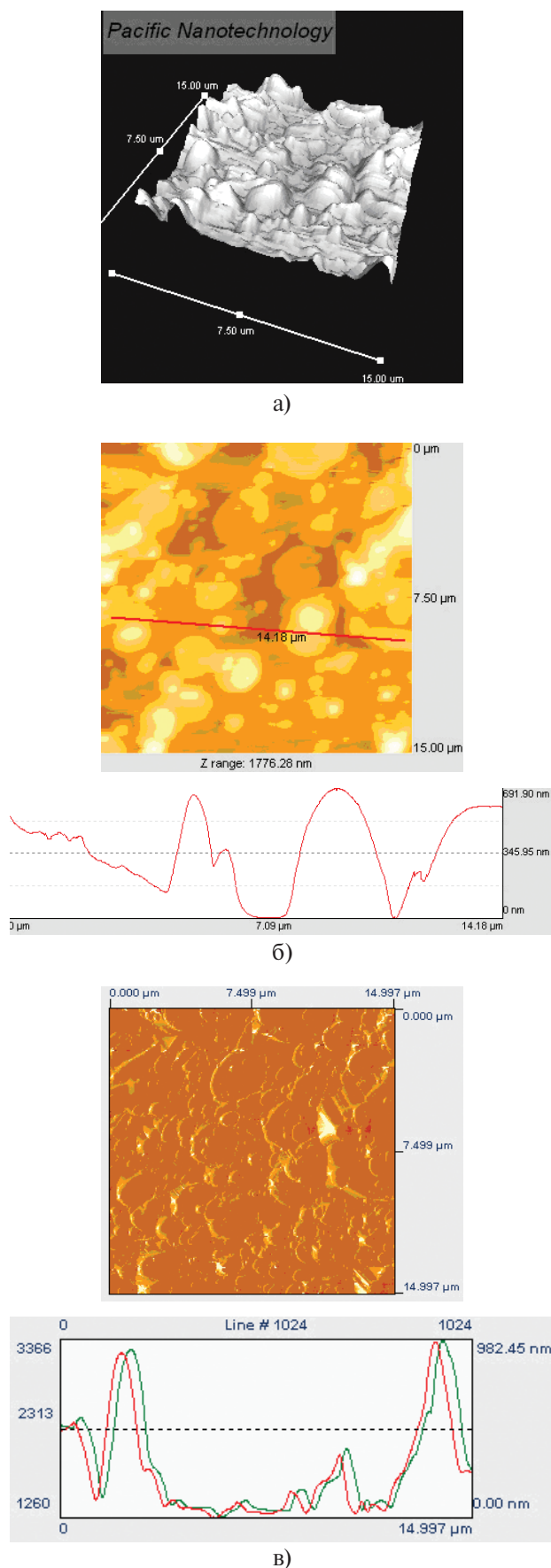


Рис. 2. Внешний вид поверхности покрытия ХН65МВ толщиной 5,8 мкм и распределение неровностей поверхности по высоте

ровностей поверхности по высоте, снятые на электронном микроскопе, представлены на рис. 2.

Результаты проведенных измерений показали следующее. Рассеивание значений толщины покрытия, измеряемых мерительной механической головкой по разности измерений, лежат в пределах менее 10% при его толщинах более 2 мкм. Зависимость средней толщины покрытия от времени напыления имеет линейный характер и примерно пропорциональный току дуги (рисунок 1). Скорость роста покрытия зависит от вида напыляемого материала, тока дуги, давления в камере и скорости перемещения образца через зону напыления.

С ростом толщины покрытия и тока дуги растёт параметр шероховатости R_a поверхности (рис. 1), что связано со стохастическим характером формирования покрытия при нормальном механизме роста, большими скоростями наращивания покрытия и наличием микрокапельной фазы металла в конденсирующемся плазменном потоке (рис. 2). Величина R_a достигает значительных значений 0,25-0,51 мкм уже при малых толщинах покрытия 1-1,6 мкм, превышая шероховатость полиимидной пленки в 2-4,5 раза, а при толщинах покрытия 7-9 мкм достигает значений 0,7-1,4 мкм (см. табл.). Вместе с тем, параметр R_a/h , характеризующий неоднородность покрытия по толщине в долях толщины покрытия, с ростом его толщины убывает и изменяется от 0,36 до 0,10 (см. табл.). Наличие такой шероховатости поверхности покрытия требует уточнения методик определения и уточнение самих понятий толщины покрытия и его удельного электрического сопротивления. Однако, значительное уменьшение шероховатости металлических покрытий не триботехнического назначения за счёт значительно уменьшения скорости его наращивания не вполне оправданно из технологических соображений из-за уменьшения производительности процесса, а также не вполне оправданно из-за того, что развитая шероховатость поверхности покрытия обеспечивает высокую прочность приклеивания внешнего герметизирующего слоя полиимидной пленки к такой поверхности.

Электрическое сопротивление покрытия измерялось на его полосках длиной $L=238$ мм и шириной $b=4$ мм, полученных конденсацией потока через специальные металлические маски. Удельное электрическое сопротивление определялось расчётным методом по соотношению

$$\rho = \frac{Rhb}{L}, \quad (1)$$

где h — среднее значение толщины покрытия, измеренное по длине и ширине резистивного слоя.

Анализ полученных результатов (рис. 1, таблица) показал, что для всех рассмотренных в работе материалов их удельное электрическое со-

противление, определяемое по (1), при толщинах покрытия меньших 1-2 мкм в 8-5 раз превышает удельное электрическое сопротивление этого материала в состоянии металлургической поставки в материале катода. При увеличении толщины покрытия его удельное электрическое сопротивление убывает и при толщинах в диапазоне 3-10 мкм принимает с погрешностью не более 4% значения, превышающие эту величину для материала в состоянии металлургической поставки, в 3,6 раза; 4,0 раза; 4,8 раза; 5,8 раза и 3,8 раза для материалов ХН65МВ; Х20Н55; 12Х18Н0Т; ВТ-1-00 и меди М1, соответственно.

Полученный результат значительного увеличения удельного электрического сопротивления вакуумных ионно-плазменных наноструктурных покрытий из различных материалов, полученных на одинаковом технологическом режиме его нанесения, а также близость значений такого увеличения 3,6-5,8 раз, позволяет предположить, что во всех рассмотренных случаях действуют близкие физические механизмы увеличения рассеивания электронов проводимости в таких покрытиях.

Однако, представляется целесообразным перед оценкой различных физических механизмов увеличения рассеивания электронов проводимости в таких покрытиях провести анализ правомерности применения соотношения (1) для расчёта удельного электрического сопротивления имея в виду, что из-за значительной шероховатости поверхности (рис. 1, 2, и таблица) параметр h в (1) не вполне корректно характеризует толщину токонесущего слоя покрытия.

В связи с этим рассмотрим (рис. 3) полосу токопроводящего покрытия длиной L , шириной b и толщиной h , измеряемой по вершинам выступов шероховатости. При измерении электрического сопротивления R этой полосы к её сечениям с координатами $x=0$ и $x=L$ прикладывается электрическое напряжение U , что приводит к протеканию полного тока I через любое сечение $0 \leq x \leq L$. Величину полного тока через некоторое сечение, перпендикулярное координате x можно записать в виде:

$$I = \int_{S(x)} j_x dS = \int_{S(x)} j_x dz dy, \quad (2)$$

где j_x — плотность электрического тока через сечение площадью $S(x)$.

Предполагая, что j_x в рассматриваемом сечении x не зависит от координат z и y и используя дифференциальный закон Ома $j_x = E/\rho$, а также определение напряжённости электрического поля $E = dU/dx$, получим:

$$I = \frac{1}{\rho} \frac{dU}{dx} \int_{S(x)} dz dy. \quad (3)$$

Обоснованность этого предположения о независимости j_x в некотором сечении x от координат z и y для полосы с прямоугольным сечением токонесущего слоя очевидна, а для полосы с шероховатой поверхностью определяется гладкостью профиля шероховатости в любом сечении этой полосы, которая следует из того факта, что радиусы скругления вершин и впадин шероховатости, имеющие характерные размеры более десятков метров, значительно превышают параметр шероховатости R_z , имеющий характерные значения в несколько микрометров [10]. В частности гладкость профиля шероховатости видна на рис. 2 с учётом того, что масштаб представленных профилей в вертикальном направлении в 5 раз больше, чем в горизонтальном.

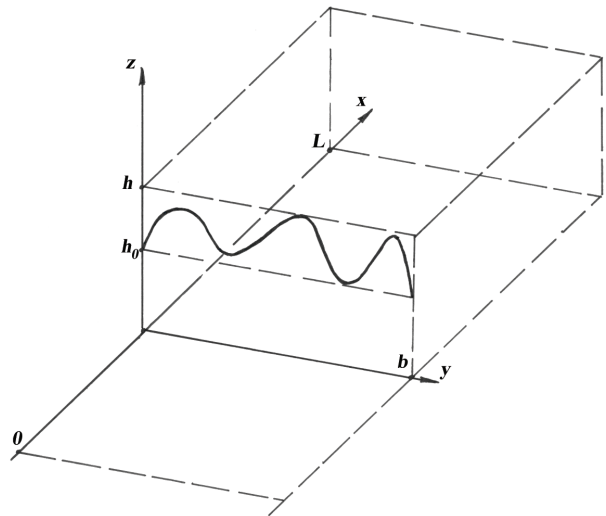


Рис. 3. Схема сечения резистивного слоя покрытия

Используя закон Ома в интегральном виде $U = RI$ и независимость полного тока I от координаты x представим (5) в виде:

$$\rho \left(\frac{dR}{dx} \right)^{-1} = S(x), \quad (4)$$

где площадь поперечного сечения полосы определяется соотношением

$$S(x) = \int_{S(x)} dz dy = \int_0^b z(x, y) dy. \quad (5)$$

Разделяя переменные интегрирования в (4) и проводя интегрирование по x в пределах длины всей полосы от 0 до L , получим

$$R = \rho \int_0^L \frac{dx}{S(x)}. \quad (6)$$

При выполнении интегрирования (6) использовано, что дифференциальная характеристика сопротивления покрытия ρ имеет смысл некоторого усреднённого параметра покрытия по его объёму и следовательно также не зависит от координаты x .

Таким образом, соотношение (6) обобщает известное соотношение (1) на случай сложной геометрии сечений токопроводящего слоя, а определение сопротивления по (6) сводится к вычислению двух интегралов в (6) и в (5). В рассматриваемом нами случае сечения огибающая его профиля со стороны роста покрытия (рис. 2 и 3) является профилограммой шероховатости поверхности и в зависимости от плоскости сечения (или направления измерения профилограммы) будет представлять собой одну из реализаций случайного процесса роста покрытия. Как показано, например в [10, 11], такие профилограммы хорошо интерпретируются как реализации стационарного процесса с нормальным законом распределения вероятностей. В этом случае площадь сечения (5) является случайной величиной. Однако для стационарного процесса, удовлетворяющего условию эргодичности при достаточной длине реализации процесса, нормируемой по базовой длине профилограммы, измеряемые параметры с высокой точностью оцениваются их математическими ожиданиями [11]. В настоящем случае длина реализации процесса по координате y составляет $b=4$ мм, а по x — $L=238$ мм, что удовлетворяет указанным условиям. В частности этот факт также вытекает из соотношения (4), в котором в левой части стоят усредненные характеристики (математические ожидания) и, следовательно, правая часть соотношения также должна представлять собой математическое ожидание от $S(x)$.

Используя подход, развитый в [11], прямым расчётом для несимметричного нормального распределения координат \hat{z} профиля профилограммы с конечной областью реализации этой случайной величины $\hat{z} \in [h_0, h]$ получим, что математическое ожидание $S(x)$ определяется соотношением

$$M[S(x)] = b(h_0 + R_p) = b(h - R_p), \quad (7)$$

где R_p и R_v — высотные параметры шероховатости ($R_p + R_v = R_{max}$), определяемые как расстояние от высшей и низшей точек профиля до его средней линии; h_0 — координата линии впадин профиля (рисунок 3); h — координата линии выступов профиля, определяющая толщину покрытия по результатам её измерения механическим методом.

Параметр R_p в (7) аналитически выражается через R_a в виде

$$R_p = kR_a,$$

где параметр k в зависимости от соотношения R_{max}/R_q принимает значения в диапазоне от 2 до 4,5.

Таким образом, с учётом (7) соотношение (6) принимает вид

$$\rho = \frac{Rb}{L} h(1 - k\xi), \quad (8)$$

где $\xi = Ra/h$.

Из соотношения (8) следует, что наличие шероховатости поверхности резистивного слоя приводит к уменьшению величины удельного электрического сопротивления, определяемого по соотношению (1), из-за того, что эффективная толщина токонесущего слоя (8) оказывается меньше толщины покрытия, измеряемой механическим методом по вершинам микронеровностей шероховатости. Как показывают данные приведенные в таблице такое уменьшение является значительным на покрытиях с толщиной менее 1-2 мкм, но на покрытиях с толщиной более 3 мкм это уменьшение составляет величину не более 30%.

Из других возможных физических механизмов увеличение удельного электрического сопротивления в исследованных ионно-плазменных покрытиях можно выделить следующее. Во-первых, это увеличение рассеивания электронов проводимости на границах субмикронных и наноразмерных кристаллах покрытия, общая площадь поверхности которых значительно превышает площадь поверхности кристаллов в материале в состоянии металлургической поставки [2, 6]. Во-вторых, вакуумные ионно-плазменные покрытия из сплавов имеют неупорядоченную структуру, которая существенно сильнее рассеивает электроны проводимости по сравнению с упорядоченной структурой металлургических сплавов, прошедших термообработку [5, 9]. В-третьих, вакуумные ионно-плазменные покрытия содержат определённое количество примесей атомов, сорбированных из атмосферы вакуумной камеры.

Анализ механизмов показывает, что из них не представляется возможным выделить один доминирующий механизм и, по-видимому, действует их совокупность, обеспечивая общее увеличение удельного электрического сопротивления покрытий по сравнению с этим же материалом в состоянии металлургической поставки.

Таким образом, проведенные исследования показали, что резистивные слои покрытий, получаемые вакуумным ионно-плазменным методом имеют в 3-5 раз большее удельное электрическое сопротивление по сравнению с материалом покрытия, но в состоянии металлургической поставки. Разработанная технология получения резистивных слоев из хромоникелевых сплавов позволила разработать новую технологию изготовления тонкопленочных гибких электронагревателей для систем терморегулирования бортовой аппаратуры космических аппаратов.

Данная работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

Литература

1. Козлов Д.И., Аншаков Г.П., Агарков В.Ф. и др. Конструирование автоматических космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 1996. — 448 с.
2. Барвинок В.А., Богданович В.И. Физические основы и математическое моделирование процессов вакуумного ионно-плазменного напыления. — М.: Машиностроение, 1999. — 309 с.
3. Богданович В.И., Барвинок В.А., Молчанов В.С. Тонкопленочные электронагреватели с наноструктурным резистивным слоем для терморегулирования бортовой аппаратуры космических аппаратов / Тез. докл. международного форума по нанотехнологиям, 3-5 декабря 2008 г. — М.: Изд. «Роснано». — Т.1. — 2008. — С. 372-373.
4. Тонкопленочный гибкий электронагреватель. Положительноерешениеипозаявке№2008144715/09 (058332) / Богданович В.И., Барвинок В.А., Асмолов А.Н., Небога В.Г., Молчанов В.С., Китаев А.И.
5. Технология тонких пленок. Справочник. Под ред. Л.Майссела, Р. Глэнга. — М.: Советское радио, 1977. — Т. 2. — 768 с.
6. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 416 с.
7. Мафшиц И.М., Азбель М.Я., Каганов М.И. Электронная теория металлов. — М.: Наука, 1971. — 415 с.
8. Комник Ю.Ф. Физика металлических пленок. Размерные и структурные эффекты. — М.: Атомиздат, 1979. — 264 с.
9. Мурто Т., Такаги Ю. Теория явлений упорядочения в сплавах. — М.: Изд. иностранной литературы, 1959. — 131 с.
10. Крагельский И.В., Добыгин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1977. — 527 с.
11. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхности. Теоретико-вероятностный подход. — М.: Наука, 1975. — 344 с.

V.I. Bogdanovich, V.A. Barvinok, A.N. Kirilin, V.G. Neboga, A.I. Kitaev, V.S. Molchanov

THIN-FILM ELECTROHEATERS WITH THE NANOSTRUCTURAL RESISTIVE LAYER

Results of research of specific electric resistance of nanostructural coverings from a number of alloys and the metals received by condensation of vacuum ionic-plasma streams on polyimide films are stated. The technique of definition of this parametre with the account of a roughness of real coverings is specified. It is shown that specific electric resistance of such coverings in (3-8) times exceeds specific electric resistance of a material of a covering, but in a condition of metallurgical delivery. The carried out researches have allowed to develop manufacturing techniques of thin-film electroheaters for system of thermoregulation of onboard equipment of space vehicles.

Keywords: thin-film electroheater, resistive layer, vacuum ionic-plasma coverings, specific electric resistance.

(начало на стр. 110)

Порядок рецензирования

1. Все поступающие для публикации научные статьи и обзоры рецензируются в обязательном порядке членами редколлегии журнала или экспертами соответствующей специальности по рекомендации Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН или членов редколлегии.
2. Статьи, поступившие с рецензией, передаются на рассмотрение членам редакционной коллегии или экспертам в соответствии со специальностью представленной работы.
3. Рецензия представленной работы должна отражать:
 - соответствие тематике журнала и актуальность темы;
 - анализ и обоснованность постановки задачи;
 - актуальность работы и ее соответствие приоритетным научным исследованиям;
 - наличие научной новизны, теоретической и практической значимости работы;
 - оценку основных результатов исследований;
 - адекватность выводов по решению поставленной задачи;
 - использование литературных источников и качество оформления работы.
4. Рекомендуемая форма рецензии размещена на сайте журнала или может быть представлена по запросу автора редакцией журнала. По форме рецензия может отличаться от предлагаемой редакцией, но обязательно должна соответствовать требованиям п. 3 данного Порядка.
5. При наличии замечаний рецензента статья передается авторам для их устранения с обязательным последующим согласованием внесенных исправлений с редакцией.