

УТОЧНЕНИЕ МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Широкое использование вакуумных плазменных технологий является одним из наиболее перспективных путей повышения эффективности машиностроительного производства. К преимуществам вакуумных плазменных технологий относятся: возможность создания и обработки практически любых материалов; значительное уменьшение технологических цепей; возможность создания автоматизированных экологически чистых производств.

Одной из важнейших задач вакуумных технологий является получение многокомпонентных покрытий.

В настоящее время для получения высококачественных многокомпонентных покрытий различного функционального назначения используется несколько методов формирования покрытий. Среди них наиболее распространенными являются: методы электронно-лучевого испарения; методы осаждения из плазмы дугового разряда и методы осаждения покрытий за счет ионного распыления (наиболее распространенным среди них является метод магнетронного распыления). Основными недостатками существующих систем при нанесении многокомпонентных покрытий являются: необходимость изготовления катодов из сплавов, соответствующих по компонентному составу формируемому покрытию; сложность и высокая стоимость изготовления многокомпонентных катодов; необходимость коррекции компонентного состава сплава, если в него входят химически активные элементы, которые реагируют с остаточной атмосферой в вакуумной камере. При переходе от одного состава покрытия к другому необходимо изготавливать катоды нового компонентного состава.

Разработанные в ХАИ оборудование и технологии получения многокомпонентных покрытий [1] позволяют устранить некоторые из перечисленных недостатков: формировать многокомпонентные многослойные покрытия сложного компонентного состава путем совместного распыления катодов-мишеней, изготовленных из материалов компонентов покрытия и проводить регулировку стехиометрии многокомпонентных покрытий в процессе их формирования.

В результате проведенных исследований предложена модель расчета процентного содержания компонентов многокомпонентного покрытия, которая учитывает физические характеристики материалов, составляющих покрытие, геометрию катодов-мишеней и изменение плотности тока на них (для данного класса установок).

При разработке модели расчета процентного содержания компонентов многокомпонентного покрытия предположено, что формирование покрытия каждого компонента происходит послойно и отношение толщины пленки одного из компонентов к общей толщине полученного конденсата численно равно процентному содержанию данного компонента [2].

Таким образом, толщина многокомпонентного покрытия на единичной площадке имеет вид

$$\delta_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N K_{ui} \cdot \frac{S_{Mi}}{S_{общ.}} \cdot K_{pi}(E_i) \cdot \frac{A_i \cdot m_a}{\rho_i \cdot t} \cdot \frac{j_{ki}}{e} \cdot t_{oc.i},$$

где K_{ui} - коэффициент использования i -го распыляемого материала, который учитывает потери массы на конструктивных элементах вакуумной камеры и определяется экспериментально (величина K_u зависит от свойств распыляемого материала, технологических параметров системы (давления плазмообразующего газа, подводимой к разряду мощности, плотности тока на катодах, величины потенциала подложки, а также конструктивных особенностей технологического отсека) и лежит в пределах 0,5...0,9); S_{Mi} - площадь поверхности i -го распыляемого компонента; $S_{общ.}$ - общая площадь поверхности, на которую наносится покрытие; $K_{pi}(E_i)$ - коэффициент распыления i -го компонента, зависящий от энергии ионов плазмообразующего газа, бомбардирующих катод-мишень; A_i - атомный вес i -го компонента; ρ_i - плотность i -го распыляемого материала; j_{ki} - плотность тока на i -й группы мишеней; $t_{oc.i}$ - время напыления i -го компонента.

Были проведены эксперименты по формированию многокомпонентных покрытий. Определение толщины полученных покрытий показало, что её можно приближенно оценить как сумму значений толщины каждого из компонентов, если бы они осаждались послойно. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа показали, что отношение толщин компонентов численно равно процентному содержанию этих компонентов в покрытии (в пределах погрешности эксперимента), т.е. можно приближенно оценить процентное содержание i -го компонента x_i в покрытии:

$$x_i = \frac{\delta_i}{\delta_{\Sigma}} \cdot 100\%,$$

где δ_i - толщина покрытия i -го компонента; δ_{Σ} - толщина многокомпонентного покрытия.

Наиболее часто при анализе состава многокомпонентных сплавов используется соотношение весовых процентов. Для определения весового процентного содержания i -го компонента y_i в покрытии необходимо знать его вес:

$$P_i = \delta_j \cdot \rho_j,$$

где P_i - вес сформированного покрытия i -го компонента на единичной площадке.

Таким образом, общий вес сформированного покрытия

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N P_i.$$

Следовательно, зная вес покрытия i -го компонента и общий вес сформированного покрытия можно приближённо оценить весовое процентное содержание i -го компонента y_i в покрытии:

$$y_i = \frac{P_i}{P_{\Sigma}} \cdot 100\%.$$

Однако предложенная модель имеет свои недостатки в силу допущений, которые использовались при её разработке: коэффициент аккомодации $\alpha \approx 1$, то есть все распыленные частицы, попавшие на подложку, осаждаются на ней; не учитывалась геометрическая прозрачность исследуемой системы; не учитывалось «перепыление» катодов-мишеней.

Эксперименты проводились по следующей программе [3]:

Серия 1. Распылялся сплав Co-Cr-Al-Y (образец № 1).

Серия 2. К распыляемому сплаву Co-Cr-Al-Y добавлялся алюминий. Для этого дополнительный катод-мишень, изготовленный из алюминия, распылялся (образец № 2).

Серия 3. К распыляемому сплаву добавлялся алюминий и никель. Для этого в схеме серии 2 дополнительно распылялся катод-мишень, изготовленный из никеля (образец № 3).

Серия 4. К распыляемому сплаву добавлялся алюминий, никель и хром. Для этого в схему серии 3 добавлялся один катод-мишень, изготовленный из хрома (образец № 4).

Проведенные исследования полученных образцов показывают достаточно хорошее соответствие предложенной модели и эксперимента. Расхождение теории и эксперимента не превышало 30 % (табл. 1).

Однако предложенная методика не позволяет с необходимой точностью рассчитать параметры нового технологического процесса формирования многокомпонентных покрытий (см. табл. 1). Поэтому для уточнения этих параметров необходимы эксперименты по определению реальной скорости распыления отдельных компонентов, составляющих покрытие.

Таблица 1 – Сравнение теории и эксперимента

Номер образца	Al		Ni		Cr	
	теория	эксперимент	теория	эксперимент	теория	эксперимент
2	37	36.5	-	0.55	-	13.6
3	15	21.5	36.7	36.4	-	8.9
4	24	22	45	40.3	19	16

Проведение дополнительных экспериментов не позволяет существенно снизить затраты на отработку нового технологического процесса. Поэтому данная методика требует уточнения. Одним из уточнений является учет геометрической прозрачности системы K_c , т.е. отношение общей площади катодов-мишеней к общей площади поверхности, на которую наносится покрытие:

$$K_c = \frac{S_{к-м}}{S_{общ}}$$

где $S_{к-м}$ - общая площадь распыляемых катодов-мишеней; $S_{общ}$ - общая площадь поверхности, на которую наносится покрытие.

В силу конструктивных особенностей разработанного генератора плазмы [1] поток распыленного с катодов-мишеней материала покрытия также осаждается на катодах-мишенях, которые, в данный момент не распыляются. Следовательно, часть распыленного материала покрытия осаждается не на подложке, а на катодах-мишенях, не участвующих в данный момент в процессе распыления.

Следует отметить, что в зависимости от компонентного состава формируемого покрытия количество катодов-мишеней может быть различным (в данной установке – максимум 12 штук). Поэтому геометрическая прозрачность системы является одним из определяющих факторов, влияющих на достоверность модели расчета.

Таким образом, расчетная формула толщины покрытия с учетом введенного уточнения имеет вид

$$\delta_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N K_c \cdot K_{ui} \cdot \frac{S_{mi}}{S_{общ.}} \cdot K_{pi}(E_i) \cdot \frac{A_i \cdot m_a}{\rho_i \cdot t} \cdot \frac{j_{ki}}{e} \cdot t_{oci} \cdot$$

Результаты теоретических и экспериментальных данных (по приведенной выше программе эксперимента) представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты уточненных теоретических и экспериментальных данных

Номер образца	Al		Ni		Cr	
	теория	эксперимент	теория	эксперимент	теория	эксперимент
2	33.3	36.5	-	0.55	-	13.6
3	13.5	21.5	33.03	36.4	-	8.9
4	21.6	22	40.5	40.3	17.1	16

Большое расхождение между экспериментальными и расчетными данными на образце № 3 связано с «перепылением» катода-мишени, изготовленного из никеля. Этот факт можно объяснить следующим образом, при формировании покрытия по схеме серии 2 катод-мишень, изготовленный из никеля, находился под «запирающим» потенциалом (это положительный потенциал, приложенный к одной из мишеней, практически полностью снижающий плотность тока на мишени, следовательно, мишень не распыляется [4]), т.е. в процессе формирования покрытий на никелевую мишень осаждался и алюминий. При проведении экспериментов по серии 3 распылялась и мишень, изготовленная из никеля. Так как на никелевой мишени был сформирован слой из алюминия, то сначала распылялся сформированный на никелевой мишени слой алюминия, который первоначально играет роль дополнительного катода-мишени, изготовленного из алюминия. Следовательно, для более полного совпадения предложенной модели расчета с экспериментальными данными при формировании многокомпонентных покрытий с заданным процентным составом необходимо учитывать факт «перепыления» мишеней. Существует несколько вариантов учета этого явления:

- подбор «задерживающего» потенциала [4] на катодах-мишенях, которые не распыляются;

- расчет толщины покрытия, формирующегося на катодах-мишенях, которые не распыляются.

Исследуемый генератор плазмы позволяет формировать и многокомпонентные многослойные покрытия, где факт перепыления мишеней может играть и положительную роль, так как при формировании многослойных покрытий конструктивные особенности установки позволяют получить переходную зону между слоями (для улучшения адгезии) без дополнительных энергетических затрат.

Выводы

Проведенный анализ разработанной ранее модели расчета процентного содержания компонентов многокомпонентного покрытия позволил выделить один из определяющих факторов, влияющих на достоверность модели. Было проведено уточнение методики и достигнуто более полное соответствие теории и эксперимента.

Проведен анализ преимуществ и недостатков факта «перепыления» катодов-мишеней.

Список использованных источников

1. Иващенко, С.С. Нанесение многокомпонентных покрытий в квазимагнетронной установке [Текст] / С.С. Иващенко, В.В. Колесник, В.П. Колесник // *Авиационно-космическая техника и технология*: тр. ХАИ им. Н.Е. Жуковского. – Х., 1998. – С. 287 – 290.

2. Формирование многослойных многокомпонентных защитных покрытий [Текст] / Н.В. Белан, В.В. Колесник, С.С. Иващенко и др // *Авиационно–космическая техника и технология*. – Х., 2004. - №7 (15). – С. 231 – 235.

3. Формирование многокомпонентных многослойных жаростойких покрытий на лопатки ГТД с помощью ионного магнетрона [Текст] / В.В. Колесник, Н.В. Белан, С.С. Иващенко и др. // *Физическая инженерия поверхности*. – 2003. – Т. 1, № 3 – 4. – С. 316 – 318.

4. Колесник, В.В. Разработка и исследование технологического процесса и оборудования для формирования многокомпонентных покрытий на лопатки ГТД: дисс. ... канд. техн. наук: 05.03.07. – Х., 2007. – 136 с.

Поступила в редакцию 26.05.2013.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.Е. Тараненко,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*