

ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ ПЛАЗМОЙ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО РАЗРЯДА ПРИ ПЛАНЕТАРНОМ ВРАЩЕНИИ ИЗДЕЛИЙ В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ

Кузнецов В.Г.

*Институт проблем машиноведения Российской академии наук,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: лопатки, газовые турбины, плазма, вакуум, нанесение покрытий, очистка поверхности, планетарный механизм, температура.

Аннотация. Рассматриваются вопросы очистки поверхности и нанесения покрытий, тепловые процессы при обработке поверхности плазмой вакуумно-дугового разряда применительно к лопаткам энергетических газовых турбин. Получены выражения, позволяющие судить о температуре изделий при их обработке в случае планетарного движения в вакуумной камере.

SURFACE TREATMENT BY VACUUM-ARC DISCHARGE PLASMA DURING PLANETARY ROTATION OF PRODUCTS IN A VACUUM CHAMBER

Kuznetsov V.G.

*Institute of Problems of Mechanical Engineering of Russian Academy of Sciences,
Saint-Petersburg*

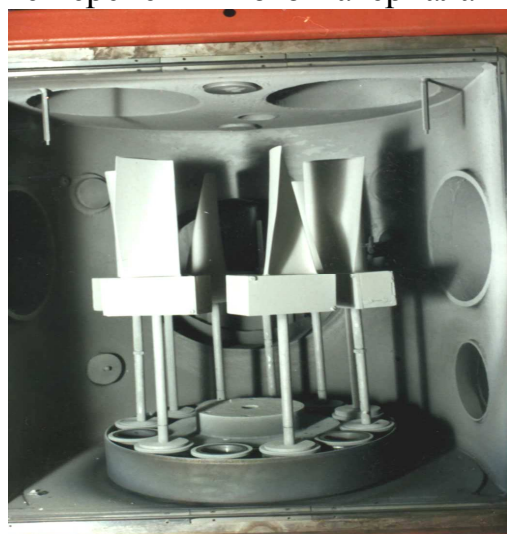
Keywords: blades, gas turbines, plasma, vacuum, coating deposition, surface cleaning, planetary mechanism, temperature.

Abstract. The issues of surface cleaning and coating deposition, thermal processes during surface treatment by vacuum-arc discharge plasma in relation to the blades of power gas turbines are considered. Mathematical expressions are obtained that allow us to judge the temperature of turbine blades during their processing in the case of planetary motion in a vacuum chamber.

Принципиально новые возможности для нанесения коррозионностойких и теплозащитных покрытий на лопатки энергетических газовых турбин открываются при использовании технологии вакуумно-дугового нанесения покрытий [1-3]. Метод вакуумно-дугового нанесения покрытий используется для промышленного нанесения защитных покрытий на лопатки авиационных двигателей [4]. Значительные размеры лопаток энергетических газовых установок, условия их эксплуатации, вид и качество газотурбинного топлива предъявляют высокие требования к виду, качеству и материалу покрытий, а также требуют специального оборудования с разработанным для него технологическим процессом.

При разработке вакуумно-дуговой технологии необходимо учитывать процессы, происходящие на эродируемом катоде испарителя, условия транспортировки плазменного потока и осаждения покрытий, температурные режимы всей системы в целом, геометрическое расположение изделий в вакуумной камере, состояние поверхности перед нанесением покрытий и некоторые другие факторы.

Разработку технологического процесса нанесения коррозионностойких и теплозащитных покрытий на лопатки стационарных энергетических газовых турбин осуществляли на материалах CoCrAlY и ZrO₂/Y₂O₃ (Рис. 1). Кроме того, в качестве перспективного материала исследовали состав NiCrWTi.



а)



Покрытие – CoCrAlY (СДП-11)
Основа – сплав ЭИ-893

б)

Рис. 1. Нанесение покрытий вакуумно-дуговым методом на лопатки газовых турбин: а) вакуумная камера установки с турбинными лопатками; б) структура вакуумно-дугового покрытия CoCrAlY

Процесс очистки поверхности изделий перед нанесением покрытий в плазме вакуумно-дугового разряда осуществляют, как правило, ионным потоком того же состава, что и при нанесении покрытия. Однако, это не всегда эффективно, как с точки зрения скорости распыления, так и возможности получения максимальных эксплуатационных свойств покрытий. Поэтому в данной работе исследовались различные материалы, формирующие плазменный поток: титан марки ВТ1-0, сталь марки 10Х18Н9Т и CoCrAlY (СДП-11), из которых изготавливались катоды вакуумно-дугового испарителя.

С целью определения скоростей распыления исследуемых покрытий плазмой вакуумно-дугового разряда, цилиндрические образцы диаметром 7 мм и длиной 30 мм с нанесенным покрытием устанавливались на планетарный механизм вращения и подвергались ионной очистке в течение 30 мин при токе дугового разряда $I = 100\text{А}$. Вместе с исследуемыми покрытиями проводилось измерение скорости распыления сплава ЭИ-893, используемого для изготовления лопаток турбин. Образцы взвешивались до и после обработки и по величине изменения массы Δm определялась скорость распыления покрытия $V_{расп}$ (мкм/мин). Результаты измерений скорости распыления покрытий плазмой катодных материалов представлены в таблице 1.

Табл. 1. Результаты измерений скорости распыления покрытий плазмой катодных материалов (мкм/мин)

катод\покрытие	CoCrAlY	NiCrWTi	CoCrAlY/ZrO ₂	ЭИ-893
Ti(ВТ1-0)	0,13	0,12	<0,01	0,21
10Х18Н9Т	0,09	0,07	-	0,15
CoCrAlY	0,05	-	-	0,10

Как видно из таблицы, скорость распыления металлокерамической системы CoCrAlY/ZrO_2 пренебрежимо мала по причине высоких диэлектрических свойств внешнего слоя ZrO_2 .

Проведенные измерения скоростей распыления антикоррозионных покрытий CoCrAlY , NiCrWTi и сплава ЭИ-893, применяемого для изготовления лопаток турбин, показало, что использование титанового катода обеспечивает наибольшую скорость распыления покрытий.

Дополнительным аргументом в пользу выбора титана в качестве материала для распыления выработавших ресурс покрытий является возможность формирования антидиффузионного слоя TiN непосредственно сразу после удаления старого покрытия. Как известно из литературы [5], использование тонкого слоя TiN , нанесенного на лопатку, позволяет повысить срок службы основного антикоррозионного покрытия.

Существенным моментом при распылении покрытия является необходимость поддержания температуры лопатки в течение всего процесса ниже граничной температуры фазовых переходов ее материала. Для сплава ЭИ-893 эта температура находится на уровне $\approx 800^\circ\text{C}$. Непосредственное определение температуры лопатки методом термопарных измерений представляет сложность в виду ее планетарного движения в вакуумной камере.

Оценка максимальной температуры при планетарном движении была выполнена следующим образом. Первоначально, с помощью хромель-алюмелевой термопары была измерена максимальная температура $T_a^{\text{экс}}$ неподвижной лопатки, установленной в зоне максимальной плотности плазменного потока испарителя (точка А). При токе дугового разряда $I_D^{\text{экс}} = 100\text{А}$ она равнялась 900°C . Затем было измерено распределение плотности ионного тока по объему камеры. Полагая, что потери мощности на теплопроводность минимальны (держатели лопаток – длинные тонкие стержни) и имеет место лишь радиационный теплообмен, для максимальной температуры лопатки можно записать:

$$T_{\max} = \sqrt[4]{\frac{q}{2\varepsilon\sigma}} + T_\phi, \quad (1)$$

где q – тепловой поток, поглощаемый поверхностью лопатки, ε – коэффициент черноты, σ – постоянная Стефана-Больцмана, T_ϕ – фоновая температура окружающего объема, ниже которой температура лопатки не может опускаться. Величина теплового потока q_i в первом приближении линейно зависит от плотности ионного тока J_i , где i указывает на то, что величины относятся к i -ой точке вакуумной камеры. Таким образом, исходя из известного значения температуры лопатки в точке камеры А, максимальную температуру нагрева неподвижной лопатки в остальных частях камеры можно определить как:

$$T_i = T_a^{\text{экс}} \sqrt[4]{\beta + (1-\beta) \frac{T_\phi^4}{T_a^4}}, \quad (2)$$

где $\beta = \frac{q_i}{q_A} = \frac{J_i}{J_A}$.

Переходя к случаю планетарного движения лопатки по камере, ее максимальную температуру можно ограничить сверху, как показано в работе [6], для импульсно-периодического режима обработки, при котором нагрев лопатки происходит в зоне А, а в остальных частях камеры температура снижается до T_i^{\max} – максимальной температуры, достижимой в точках $i \neq A$. Если через $T_\phi = T_i^{\max}$ обозначить нижнюю границу температуры лопатки при планетарном вращении, а скважность процесса определить как:

$$\alpha = \frac{\tau_a}{\tau_a + \tau_i} \tag{3}$$

где τ_a – время нахождения лопатки в зоне А (время нагрева), τ_i – время нахождения лопатки в остальной части камеры (время остывания до T_ϕ^i), то

$$T_{\max}^{\text{план}} = T_A^{\text{экс}} \sqrt[4]{\alpha + (1 - \alpha) \frac{T_\phi^4}{T_a^4}}. \tag{4}$$

Используя (2), (4), получаем:

$$T_{\max}^{\text{план}} = T_A^{\text{экс}} \sqrt[4]{\alpha + (1 - \alpha) \left(\beta + (1 - \beta) \frac{T_\phi^4}{T_a^4} \right)}. \tag{5}$$

Выражение, связывающее ток дугового разряда I_H , необходимый для поддержания температуры лопатки при планетарном вращении на заданном уровне T_H , можно получить исходя из экспериментально измеренных значений $T_A^{\text{экс}}$ и $I_D^{\text{экс}}$, используя формулу Стефана-Больцмана и предполагая, что тепловой поток на лопатку линейно зависит от тока разряда:

$$\frac{T_H}{T_A^{\text{экс}}} \approx \sqrt[4]{\frac{I_H}{I_D^{\text{экс}}}}.$$

Учитывая, что обычно $T_\phi \ll T_A^{\text{экс}}$, и используя (3), получаем

$$I_H = \left(\frac{T_H}{T_A^{\text{экс}}} \right)^4 \cdot \frac{I_D^{\text{экс}}}{\alpha + \beta(1 - \alpha)}. \tag{6}$$

Таким образом, полученные выражения позволяют судить о температуре изделий при их обработке в случае планетарного движения в вакуумной камере. При необходимости температуру можно регулировать технологическими параметрами режима обработки в соответствии с выражением (6).

Одним из основных преимуществ предложенного метода удаления старого покрытия заключается в том, что на полученную атомно-чистую поверхность лопатки, без открывания вакуумной камеры, возможно нанесение нового антикоррозионного покрытия. При этом исключается окислительное действие открытой атмосферы на поверхность лопатки после удаления старого покрытия.

Список литературы

1. Буров И.В., Валуев В.П., Кузнецов В.Г. и др. Повышение надежности турбинных лопаток методом вакуумно-дугового нанесения покрытий // Сварочное производство. – 1990. – № 5. – С. 13-16.

2. Damond E., Jacqout P., Denisse E. NiCoCrAlYTa coatings deposited by the cathodic arc evaporation technique. // *Le Vide, les Couches Minces. Suppl.* 1992, no. 261, pp. 194-202.
3. Vetter J., Knotek O., Brand J, Beele W. MCrAlY coatings deposited by cathodic vacuum arc evaporation // *Surface and Coat. Technol.* 1994, vol. 68/69, pp. 27-31.
4. Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Промышленная установка МАП-1 для нанесения защитных покрытий различного назначения // *Авиационная промышленность.* – 1995. – №7-8. – С. 44-48.
5. Burman S., Ericson T., Kvernes I., Lindblom Y. A comparison between different compounds on superalloys // *Surface and Coat. Technol.* 1988, vol. 36. no. 1, pp. 1-12.
6. Остроухов Н.Н., Суворов А.Н. Температурный режим подложки при импульсно-периодической обработке в вакууме // *Электронная обработка материалов.* – 1990. – № 5. – С. 56-59.

Сведения об авторе:

Кузнецов Вячеслав Геннадьевич – д.т.н., заведующий лабораторией ИПМаш.