УДК 621.438.082

И.Д.БУЛИКИН
Горно-электромеханический факультет, группа ТНГ-05-1

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ АЛЮМИНИДНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Показана возможность использования алюминидных покрытий системы Cr-Co-Al-Y для нанесения на поверхность турбинных лопаток газотурбинного двигателя, применяемого на компрессорных станциях. Нанесение алюминидных покрытий увеличивает надежность эксплуатации лопаток и позволяет совершенствовать конструкцию установки для повышения КПД.

There is shown possibility of using covering consists of Cr-Co-Al-Y for protection blades of turbines that are used in compressor stations. In conclusion it is said that using these coverings increase reliability of exploitation of turbine's blades and give opportunity for developing jet turbine engines for rising of efficiency.

В последние годы в ОАО «Газпром» особое внимание уделяется повышению надежности эксплуатации газоперекачивающих агрегатов. В статье рассматривается один из путей повышения надежности лопаток газотурбинного двигателя ГТН-6, применяемого на дожимной компрессорной станции (ДКС) Вынгапуровского газового промысла ООО «Газпром Добыча Ноябрьск», путем нанесения на поверхность лопаток плазменных алюминидных покрытий следующего состава: $Ñr_{0,195}Co_{0,137}Y_{0,178}Al_{0,49}$ и $AlCo_{0,158}Cr_{0,084}Y_{0,003}$.

Двигательная установка выполнена по простому открытому циклу без регенерации тепла со свободной силовой турбиной. Воздушный осевой компрессор, состоящий из компрессора низкого давления (КНД) и компрессора высокого давления (КВД) (рис.1), засасывает очищенный от пыли атмосферный воздух и сжимает его до давления 0,6 МПа. Сжатый воздух поступает в камеру сгорания (КС), куда подводится и топливный природный газ. Из КС продукты сгорания при температуре 770-800 °С поступают в турбину высокого давления (ТВД), далее в турбину низкого давления (ТНД), откуда при температуре 540 °С в силовую турбину (ТС), а затем через дымовую трубу выбрасываются в атмосферу.

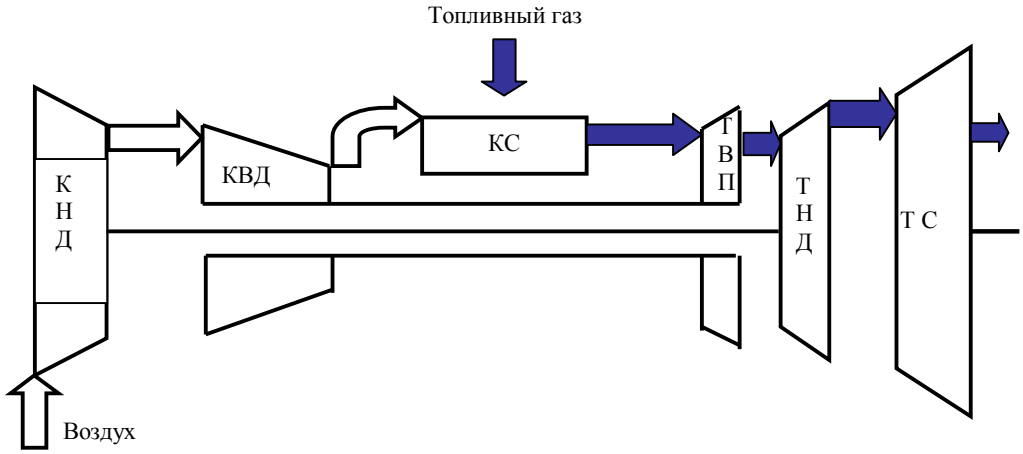


Рис.1. Принципиальная схема установки ГТН-6

Лопатки ротора ТВД имеют закрученный профиль с уменьшающейся хордой по высоте. Материал лопаток – никелевый сплав ХН65ВМЮТ. Эксплуатационный ресурс лопаток ТВД – 60000 ч при температуре 800 °С. Однако опыт эксплуатации ГТН-6 на предприятии ООО «Газпром Добыча Ноябрьск» показывает, что в ряде случаев лопатки ТВД свой ресурс не вырабатывают вследствие их разрушения. Основной причиной слома лопаток является их интенсивное коррозионное разрушение в продуктах сгорания. Поэтому в технических требованиях на дефектацию и ремонт деталей и узлов (СКБ «Газтехремонт», 1993) рекомендуется заменить лопатку при глубине коррозии металла более 0,4 мм. Можно сделать вывод, что повышение надежности эксплуатации лопаток ТВД является важной практической задачей.

Найдены сведения [3] о благоприятном влиянии алюминидных покрытий на жаростойкость никелевого сплава ЖС-32 в воздухе при температуре 1000 °С. Предстояло оценить, насколько эти данные применимы для условий эксплуатации турбинных лопаток из сплава ХН65ВМЮТ в среде продуктов сгорания природного газа. Для этого необходимо сравнить химический состав сплавов ЖС-32 и ХН65ВМЮТ, а также их жаростойкость при температуре 1000 °С в среде воздуха и продуктах сгорания.

Химический состав сплавов ЖС-32 и ХН65ВМЮТ, % по массе:

Сплав	ЖС-32	ХН65ВМЮТ
Ni	65-67	65-70
Cr	4,3-5,6	15,0-17,0
W	7,7-9,3	8,5-10,0
Mo	0,8-1,4	3,5-4,5
Al	5,6-6,9	1,4-1,7

Имеются сведения [2] о глубине коррозионного поражения h сплава ХН65ВМЮТ в воздушной среде в интервале температур 500-800 °С при длительности испытаний 500 ч. Для экстраполяции этих данных на более высокие температуры потребовалось вывести кинетическое уравнение процесса окисления сплава на воздухе. При этом исходили из того, что кинетика процесса подчиняется уравнению Аррениуса. Данные эксперимента аппроксимировали экспоненциальной зависимостью $h = h_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$. В соответствии с расчетом были получены следующие значения предэкспонента и энергии активации уравнения: $h_0 = 2{,}4 \cdot 10^8$ мм и $E = 210$ кДж/(моль·К). Полученное значение энергии активации оказалось близким величине E, полученной в [1] для процесса окисления на воздухе чистого никеля, $E = 225$ кДж/(моль·К).

По полученному уравнению была рассчитана глубина коррозии сплава при 1000 °С, которая для 500-часовой экспозиции оказалась равной 0,059 мм.

Имеющиеся данные [2] о жаростойкости сплава ЖС-32 относятся к окислению на воздухе и установлены в виде зависимости изменения массы образцов Δm от времени окисления при температуре 1000 °С (рис.2, кривая 1). Величина Δm для 500-часовой выдержки была оценена нами в 0,06 г/см^2. Величину Δm пересчитывали на глубину коррозионного поражения h сплава. При этом исходили из того, что основным продуктом коррозии является оксид никеля NiO: $h = \Delta m / \rho_{Ni} = 0{,}06[\text{ã/ñì}^2] / 8{,}9[\text{ã/ñì}^2] = 0{,}0067\ \text{ñì} = 0{,}067\ \text{ìì}$.

Сопоставляя величины h для упомянутых сплавов, заключаем, что отличие в глубине коррозии между сплавами $\varepsilon = |0{,}067 - 0{,}059| / 0{,}067 = 12\,\%$, что вполне удовлетворительно.

Основание возможности применения результатов испытаний сплавов на воздухе к условиям эксплуатации лопаток дает сравнение химических составов воздуха и продуктов сгорания природного газа в ГТН-6 при коэффициенте избытка окислителя $\alpha = 4$, что возможно в реальных установках. Результаты расчетов представлены ниже:

	N_2	O_2	CO_2	H_2O
Воздух	78,5	20,94	0,03	–
Продукты сгорания	75,9	18,4	3,1	2,6

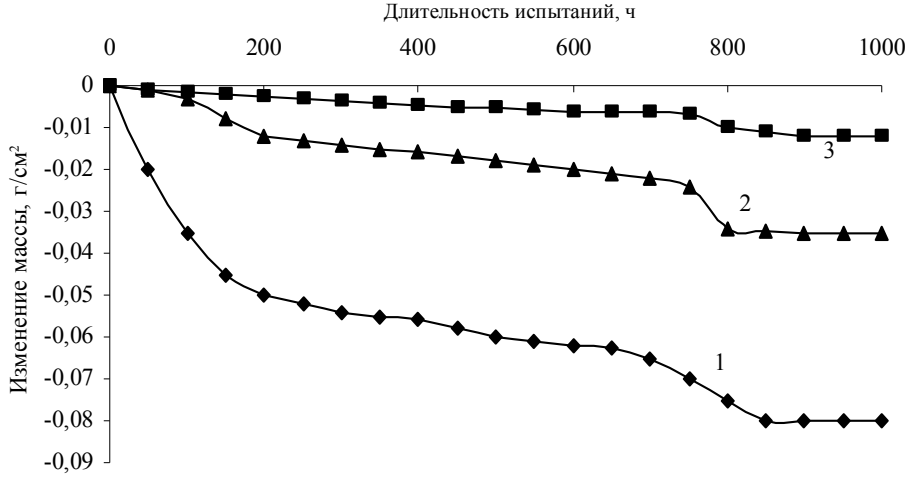


Рис.2. Изменение массы образца сплава ЖС-32 без покрытия (1), с покрытием $\tilde{N}r_{0,195}Co_{0,137}Y_{0,178}Al_{0,49}$ (2) и $AlCo_{0,158}Cr_{0,084}Y_{0,003}$ (3) в условиях циклического нагрева на воздухе при 1000 °С

Видно, что по содержанию основного окислительного реагента – кислорода, сравниваемые среды очень близки. Это позволяет сделать вывод, что результаты коррозионных испытаний, полученные для сплава ЖС-32 на воздухе, могут быть применены с достаточной степенью достоверности к поведению сплава ХН65ВМЮТ в продуктах сгорания природного газа в установке ГТН-6.

В анализируемой работе [3] исследуемые алюминидные покрытия наносились на образцы сплава ЖС-32 плазменным методом в среде инертных газов. Толщина напыления составляла 80-100 мкм. После вакуумного отжига образцы, обмеренные микрометром и взвешенные, помещали в алундовых тиглях в термическую печь и подвергали циклическому нагреву (125-160 циклов) в течение 1000 ч с продолжительностью одного цикла 6-8 ч. После каждого цикла нагрева образцы взвешивались для определения изменения их массы. Результаты этих испытаний показаны на рис.2.

Из вида кривой 2 на рис.2 видно, что в случае применения плазменного покрытия $\tilde{N}r_{0,195}Co_{0,137}Y_{0,178}Al_{0,49}$ масса образца медленно убывает, что связано с отслаиванием окалины, при этом скорость коррозии в три раза меньше, чем при аналогичных испытаниях сплава ЖС-32 без покрытия. В случае применения покрытия $AlCo_{0,158}Cr_{0,084}Y_{0,003}$ (рис.2, кривая 3) масса образца практически не изменяется. В этом случае скорость коррозии в 20 раз меньше, чем у сплава ЖС-32 без покрытия.

Предполагая, что вид кинетических кривых (рис.2) при увеличении продолжительности испытаний не изменяется, результаты эксперимента экстраполировали на срок эксплуатации лопаток 60 тыс.ч. В соответствии с результатами расчета было получено значение глубины коррозионного поражения 0,67 мм, близкое к допустимому. В случае применения лопаток без покрытия значение соответствующего параметра увеличится в 20 раз.

Можно заключить, что применение алюминидных покрытий Cr-Co-Al-Y значительно увеличит жаростойкость материала лопаток в условиях их работы в ТВД, что повысит надежность их эксплуатации. Применение предложенных покрытий позволит повысить температуру сгорания топлива в ГТН-6 до 1000 °С, что увеличит КПД установки на 3 %. Это может быть достигнуто уменьшением коэффициента избытка воздуха, что в свою очередь приведет к уменьшению содержания кислорода в продуктах сгорания и, следовательно, умень-

шению агрессивности среды, в которой работают лопатки.

Таким образом эффект от применения алюминидных покрытий проявляется в увеличении надежности эксплуатации лопаток; увеличении межремонтного периода; снижении затрат на эксплуатацию ГПА в целом; возможности доработки конструкции ГТН-6 с целью повышения температуры газа перед ТВД и увеличения номинальной мощности ГТД; увеличении КПД установки.

Применение подобных покрытий для лопаток ГТД из других никелевых сплавов позволит достигнуть положительного эффекта и в случае других газотурбинных установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Болобов В.И.* Высокотемпературное окисление некоторых металлических материалов в присутствии атомарного кислорода / В.И.Болобов, К.М.Макаров // Защита металлов. 1992. № 6.

2. *Зубченко А.С.* Марочник сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 2003.

3. *Зязев В.Л.* Жаростойкость плазменных алюминидных покрытий системы Cr-Co-Y-Al в условиях циклического нагрева на воздухе / В.Л.Зязев, В.А.Ватолин, Р.И.Гуляева и др. // Металлы. 2003. № 1.

Научный руководитель д-р т. н. проф. *В.И.Болобов*