

**Тополянский П.А., Соснин Н.А. Нанесение эрозионностойких покрытий на вентиляционные лопатки турбогенераторов методом плазменного напыления. Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций. Материалы 3-й Всероссийской практической конференции-выставки 27-28.03. 2001 г. СПб. Изд. СПбГТУ, 2001. - С. 33-39**

## **НАНЕСЕНИЕ ЭРОЗИОННОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ВЕНТИЛЯЦИОННЫЕ ЛОПАТКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ**

**П.А. ТОПОЛЯНСКИЙ, Н.А. СОСНИН**

**НПФ «Плазмацентр», Санкт-Петербург, Россия**

Охлаждение турбогенераторов, являясь одним из важнейших факторов надежности, увеличения единичной мощности и коэффициента полезного действия, осуществляется направленными потоками воздуха, водорода, жидкости или их комбинаций. Для обеспечения циркуляции газа по замкнутому контуру внутри турбогенераторов симметрично на роторе устанавливаются вентиляторы. Наибольшее распространение получили осевые вентиляторы, обеспечивающие течение газа вдоль оси вращения, и состоящие из ступицы с закрепленными в них вентиляционными лопатками. Последние представляют собой винтообразное крыло переменного сечения с углом поворота, плавно изменяющимся от основания лопатки к ее вершине. Сечение по рабочей части лопатки ограничено с одной стороны прямой линией, а с другой - координатной кривой. Вентиляционные лопатки изготавливаются методом точного литья по выплавляемым моделям из стали 27ГСЛ.

В условиях эксплуатации турбогенераторов на тепловых и атомных электростанциях имеет место эрозионное разрушение лобовых и набегающих боковых поверхностей крыла лопаток, связанное с ударным воздействием потока газа, содержащего инородные включения (песчинки пыли, масляный дождь, частицы, образующиеся вследствие трения деталей и др.). Интенсивность разрушения определяется скоростью удара, концентрацией частиц в окружающей среде, а также характером зависимости скорости уноса массы от времени. Износ вентиляционных лопаток ведет к дисбалансу, значительным вибрационным нагрузкам, увеличенному шуму и требует их замены, что удлиняет регламентный ремонт турбогенератора.

С целью повышения долговечности и надежности вентиляционных лопаток турбогенераторов разработан технологический процесс плазменного напыления защитного покрытия против газоабразивного износа.

Для оценки стойкости в условиях газоабразивного износа разработана методика и экспериментальный стенд (рис. 1), в котором обеспечивались реальные условия эксплуатации вентиляционных лопаток турбогенераторов: скорость эрозионного потока - 200-210 м/с и его температура - 100-110° С. Проведение испытаний на стенде

возможно при трех углах атаки потока частиц к плоскости обрабатываемой поверхности: 22,5°; 45°; 67,5°. В качестве абразивного материала использовался электрокорунд белый марки 23А фракции М40. Расход эрозионного материала составлял 0,02-0,05 г/с.

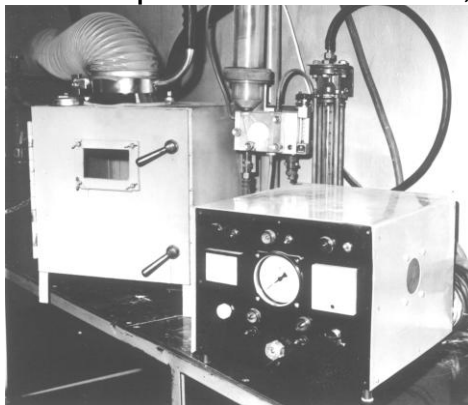


Рис. 1. Стенд для оценки стойкости в условиях газоабразивного износа

Схема установки для эрозионных испытаний показана на рис. 2. Установка представляет собой камеру с внутренними размерами 400x400x400 мм, в боковой стенке которой устанавливался эрозионный пистолет. Расположение пистолета и расстояние от среза его сопла до поверхности образца регулировалось элементами крепления. Исследуемый образец устанавливался на платформу, прикрепленную через эластичную прокладку к днищу камеры. При помощи магнитного вибратора, воздействующего на платформу, к образцу передавались колебания частотой 50 Гц. Амплитуда вибрации поддерживалась постоянной и определялась конструкцией крепления платформы в камере, а также величиной напряжения, питающего обмотку вибратора. Скорость и содержание частиц в потоке определялись режимом работы дозатора с абразивным материалом и расходом воздуха, подаваемым в пистолет.

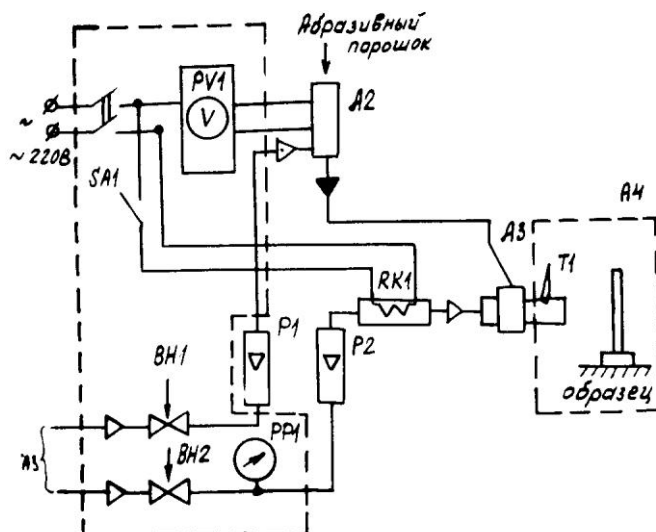


Рис. 2. Схема стенда для испытаний в условиях газоабразивного износа, где А2 - порошковый дозатор; А3 - эрозионный пистолет; А4 - камера; ВН1, ВН2 - вентили; Р1, Р2 - ротаметры; РР1 - манометр; РV1 - вольтметр; RК1 - нагреватель; SA1 - выключатель; Т1 - термометр

На образцы, изготовленные из стали Ст40 размерами 100x45x8 мм, напылялись различные покрытия, имеющие максимальную адгезионную прочность. После этого образцы взвешивались. Каждый тип покрытия подвергался эрозионному воздействию последовательно при трех разных углах атаки. Расстояние от среза сопла эрозионного пистолета до поверхности образца поддерживалось порядка 20 мм. Время при всех испытаниях имело постоянное значение, равное длительности воздействия эрозионного потока до появления видимого износа при установке образца под углом 22,5°. После испытания каждого образца определялось изменение массы и производились сравнения эрозионных характеристик (вид и форма эрозионных каверн) образцов. Также оценивались образцы без покрытия, изготовленные из стали 27ГСЛ.

За критерий оценки эрозионной стойкости принималась величина  $\chi$ , равная отношению массового уноса материала покрытия к мощности эрозионного потока:  $\chi = \Delta m / q$  [г·см<sup>2</sup>/Вт], где  $q = W / S \cdot t$ ,  $W = m_n V^2 / 2$ ,  $\Delta m$  - унос массы образца [г],  $W$  - энергия эрозионного потока [Дж],  $S$  - площадь сечения потока на срезе сопла пистолета [см<sup>2</sup>],  $t$  - время испытаний [с],  $m_n$  - масса абразивного порошка [кг],  $V$  - скорость потока частиц [м/с].

Чем меньше критерий  $\chi$ , тем выше эрозионная стойкость. Введение данного критерия позволяло минимизировать ошибку, связанную с разбросом времени испытаний из-за состояния абразивного порошка.

В качестве методов нанесения покрытий рассматривались: воздушно-плазменное и детонационное напыление. Исследовалась эрозионная стойкость следующих покрытий: интерметаллидов (Ni -Ti), оксидов (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), карбидов (карбиды титана, хрома), стеллита.

Установлено, что при эрозионных испытаниях с углом атаки 67,5° форма эрозионной каверны представляет собой правильную окружность. При малых скоростях плазменного потока и, соответственно, незначительных скоростей частиц напыляемого порошка, вид поверхности каверны имеет пористую структуру. По мере увеличения скорости частиц (путем уменьшения диаметра сопла), поверхность каверны приобретает гладкую поверхность, что указывает на высокий уровень когезионной прочности покрытия. Однако, при высоких скоростях частиц напыляемого порошка, когда покрытия характеризуется высокой плотностью, а уровень внутренних напряжений максимален, происходит растрескивание поверхности при эрозионных испытаниях. Это связано с низким уровнем адгезионной прочности покрытий в данной области режимных параметров. Исследование формы и вида эрозионных каверн при угле атаки 45° показало качественно аналогичные результаты: форма каверны соответствует слабо вытянутому эллипсу, а вид поверхности - характеризуется высокой шероховатостью. Исследование формы и вида эрозионных каверн при угле атаки 22,5° показало, что форма каверны также соответствует эллипсу, а поверхность - характеризуется наиболее высоким уровнем шероховатости. Этот вид эрозионного износа (под малыми углами

атаки) наиболее важен для изучения эрозионной стойкости лопаток турбогенераторов, т.к. в реальных условиях его работы, поток обтекает поверхность лопатки, т.е. их эрозионный износ преобладающе происходит под малыми углами атак эрозионных частиц.

Проведенные испытания на газообразивный износ (табл. 1) показали, что наибольшей эрозионной стойкостью при малых углах атаки эрозионного потока обладает покрытие электрокорунда белого марки 25А фракции М28 напыленного в плазме воздуха при диаметре сопла 9 мм, т.е. при наиболее низких скоростях плазменного потока. В этом случае достигается увеличение эрозионной стойкости в 5,9 раза. Близкое, но несколько меньшее увеличение эрозионной стойкости (в 5,5 раза) достигается при детонационном напылении электрокорунда белого марки 25А. При напылении покрытий из нормального электрокорунда марки 15А, имеющего добавки других оксидов, эрозионная стойкость уменьшается, однако она превышает эрозионную стойкость стали 27ГСЛ в 2,96 раза.

Таблица 1

№	Материал	Метод напыления	Относительная эрозионная стойкость при угле атаки		
			22,5°	45°	67,5°
1	ПН55Т45 (Ni-Ti)	воздушно-плазменный	1,38	0,39	0,55
2	Стеллит (ВЗК)	“	1,94	0,87	0,64
3	КХНп-25	“	1,33	0,66	1,22
4	Карбид титана	“	1,3	0,39	0,48
5	Оксид хрома	“	1,12	0,33	0,45
6	Электрокорунд 25А	“	5,9	0,78	0,74
7	Электрокорунд 15А	“	2,96	0,49	0,51
8	Электрокорунд 25А	детонационный	5,5	0,76	0,92

Процесс воздушно-плазменного напыления при низких скоростях плазменного потока обеспечивает повышенную когезионную прочность покрытия, за счет увеличения времени пребывания напыляемых частиц в зоне нагрева плазменной струи. Поэтому эрозионная стойкость покрытия из электрокорунда марки 25А, нанесенного при малых скоростях плазменного потока превышает стойкость покрытия из этого же материала, нанесенного при повышенных скоростях плазменного потока. Уменьшение эрозионной стойкости покрытий из электрокорунда марки 15А объясняется наличием добавок, которые уменьшают равнопрочность фаз в покрытии. Это приводит к выборочному уносу более мягких фаз ( $Fe_2O_3$ ,  $TiO_2$  и др.) и более интенсивному разрушению покрытия в целом. Относительная эрозионная стойкость покрытия из

стеллита составляет 1,94, т.е. практически в два раза превышает стойкость стали 27ГСЛ. Незначительное увеличение эрозионной стойкости (на 10-30 %) при угле атаки  $22,5^\circ$  получено на некоторых режимах нанесения покрытий из порошков интерметаллидов (Ni-Ti), карбидов (КХНп25) и оксида хрома ( $Cr_2O_3$ ).

При увеличении угла атаки частиц, требования к покрытиям меняются. В этом случае увеличение эрозионной стойкости получено при напылении порошка КХНп-25 (в 1,22 раза). Эрозионная стойкость близкая к стойкости материала 27ГСЛ получена при плазменном и детонационном напылении электрокорунда белого марки 25А.

Таким образом, в результате проведенных исследований эрозионной стойкости образцов с покрытиями для условий малых углов атаки эрозионного потока, рекомендуется напыление при низких скоростях плазменного потока следующих покрытий: электрокорунда (повышение эрозионной стойкости в 6 раз), стеллита (повышение эрозионной стойкости в 2 раза).

Вентиляционные лопатки с покрытием стеллита (рис. 3) установлены на роторах турбогенераторов ТВФ-100-2 («Горэнерго», г. Горький), ТВВ-200-2А (Прибалтийская ГРЭС, г. Нарва), ТВФ-100-2 (Дзержинская ТЭЦ, г. Дзержинск). Эксплуатационные испытания вентиляционных лопаток показали повышение их долговечности минимум в два раза.



Рис. 3. Процесс напыления вентиляционной лопатки