

4) с уменьшением длины гибкой части и увеличением внутреннего диаметра частота собственных колебаний металлического рукава повышается.

5) при увеличении перегрузки резонансная амплитуда увеличивается, а собственная частота уменьшается.

Библиографический список

1. Кривошеева С.Я. Методики расчёта околорезонансных колебаний гофрированных оболочек трубопроводов ГПА: Дис. канд. техн. наук. Тюмень, 2007. 134 с.

2. Крюков А.И., Глинкин И.М., Фионин В.И. Гибкие металлические рукава. М.: Машиностроение, 1970. 204 с.

УДК 621.793

СВОЙСТВА ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

©2016 Ю.П. Тарасенко, О.Б. Бердник, И.Н. Царёва

Институт проблем машиностроения РАН - филиал Федерального исследовательского центра «Институт прикладной физики Российской академии наук», Научно-производственный центр «Трибоника», г. Нижний Новгород

HEAT-SHIELDING ZIRCONIA COATING OBTAINED BY DIFFERENT METHODS

Tarasenko Y. P., Berdnik O. B., Tsareva I.N. (Institute of problems of mechanical engineering sciences branch of federal State budgetary scientific institution Federal Research Centre Institute of applied physics of the Russian Academy of Sciences. Research and production center "Tribonika", Nizhny Novgorod, Russian Federation)

This paper presents the results of research of structure, phase composition and operational properties of thermal barrier ceramic coatings obtained by the methods of electron beam and plasma powder spraying.

Традиционными методами нанесения теплозащитных покрытий являются вакуумное электронно-лучевое напыление и плазменное порошковое напыление. С точки зрения эксплуатационных свойств покрытий наиболее зарекомендовал себя электронно-лучевой метод, позволяющий получать малопористые покрытия разного состава. Однако возможности данного метода ограничены размерами вакуумной камеры.

На сегодняшний день уровень техники в области газотермического напыления насыщен разными способами нанесения покрытий: детонационное напыление, высокоскоростное напыление, плазменное порошковое напыление, газодинамическое напыление, высокочастотное напыление.

Среди методов газотермического нанесения плазменное порошковое напыление на воздухе по показателям «температура-скорость» занимает второе место после плазменного напыления в динамическом вакууме. Он основан на использовании тепловой и кинетической энергии плазменной струи, генерируемой плазмотроном. Однако эксплуатационная практика свидетельствует

о недостаточно высоких показателях жаростойкости и теплозащиты покрытий, формируемых методом традиционного плазменного напыления при использовании стандартного оборудования.

Для создания теплозащитного покрытия ZrO_2 с улучшенными эксплуатационными свойствами в НПЦ «Трибоника» была модифицирована технология плазменного порошкового напыления посредством использования плазмотрона (мощностью 50-70 кВт) усовершенствованной конструкции за счёт введения секционированной вставки и кольцевой схемы ввода порошковой смеси. Модернизация плазмотрона позволила стабилизировать ток дуги и повысить энергетические характеристики плазменного потока ($V_{\text{частиц}}=325\text{ м/с}$, $T = 6500\dots 7000\text{ К}$). Процессы сверхбыстрой рекристаллизации (время затвердевания частиц $10^{-5}-10^{-7}\text{ с}$), сопровождающие напыление, приводят к фиксации метастабильных структурных состояний формируемого материала покрытия.

Объектами исследований в данной работе являлись теплозащитные покрытия, нанесенные на рабочие лопатки турбин, изго-

товленные из жаропрочных никелевых сплавов электронно-лучевое и газоплазменное покрытия ZrO_2 (ПАО «КУЗНЕЦОВ», г. Самара); плазменное покрытие ZrO_2 (ПАО «Авиадвигатель», г. Пермь); электронно-лучевое покрытие ZrO_2 (НПО «Сатурн» ПАО, г. Рыбинск); покрытие ZrO_2 НПЦ «Трибоника», г. Нижний Новгород), сформированное из порошковой смеси марки ЦрОИ-7 на интерметаллидном подслое системы «Ni-Co-Cr-Al-Y» из порошка марки ПНХ20К2Ю13-1 методом высокоэнергетического плазменного напыления на воздухе.

Результаты исследований микроструктуры, фазового состава и физико-механических свойств теплозащитных покрытий ZrO_2 разных производителей показали, что:

- Характерной особенностью микроструктуры электронно-лучевых покрытий является формирование зёрен столбчатой формы, а при высокоэнергетическом плазменном напылении столбчатый характер имеет субструктура зёрен ZrO_2 с поперечным размером ~100 нм [1].

- Наилучшим комплексом физико-механических характеристик обладает теплозащитное покрытие, полученное методом высокоэнергетического плазменного напыления.

- Оптимизация фазового состава (за счёт увеличения содержания кубической фазы ZrO_2), улучшение показателей пористости, плотности и твёрдости является важным с точки зрения обеспечения таких эксплуатационных свойств, как жаростойкость, эрозийная стойкость и эффективность теплозащиты.

- Сравнительные испытания жаростойкости показали, что образцы с покрытиями, нанесёнными электронно-лучевым и стандартным плазменным методами, имеют отслоения покрытий. Возможной причиной разрушений целостности покрытий в процессе высокотемпературных испытаний является наличие сквозной пористости как в покрытии ZrO_2 , так и в подслое, что облегчает доступ агрессивной среды и ускоряет процесс высокотемпературного коррозионного растрескивания. Низкая адгезионная

прочность может быть обусловлена недостаточной предварительной обработкой поверхности перед нанесением.

Все исследованные в данной работе покрытия имеют как свои недостатки, так и преимущества. Покрытия работоспособны и успешно применяются для решения конкретных задач разными изготовителями. Следует отметить, что жаростойкие и теплозащитные покрытия нашли свое применение, в основном, в авиационном двигателестроении. В энергетической и газоперекачивающей отраслях применение защитных покрытий до сих пор не нашло должного распространения. Большинство новых деталей горячего тракта ГТД выпускается без покрытий. Поэтому задача широкого внедрения защитных покрытий в отечественное производство как новых, так и восстановленных деталей в условиях экономического кризиса является крайне актуальной. Задача импортозамещения, поставленная сегодня перед отечественной промышленностью, предъявляет повышенные требования к эксплуатационным свойствам разрабатываемых материалов и покрытий.

По результатам проведенных комплексных исследований покрытие ZrO_2 производства НПЦ «Трибоника», полученное методом высокоэнергетического плазменного напыления, является конкурентоспособным на отечественном рынке теплозащитных покрытий. Данное покрытие внедрено на предприятиях ПАО «Газпром» и ПАО ЕС России для продления ресурса рабочих лопаток турбин ГТД газоперекачивающих агрегатов ГТК-10И и энергетических установок ДЖ59 и ДГ90. Этот метод незаменим при нанесении теплозащитных покрытий на внутренние поверхности крупногабаритных деталей горячего тракта ГТД.

Библиографический список

1. Тарасенко Ю.П., Царева И.Н., Бердник О.Б., Фель Я.А. Структура и физико-механические свойства жаропрочных газоплазменных покрытий NiCrCoAlY/ ZrO_2 для турбинных лопаток газотурбинных двигателей. // Вестник Самарского Государственного Аэрокосмического Университета. Самара. 2011. № 3 (27). Ч.2. С. 164-169.