

Система крепления теплозащитной футеровки из высокопористого керамического волокнистого композита к металлической подложке

А.А. Петухов, Н.Ю. Филатов
Филиал АО «ОДК» «НИИД», Москва

Приведена краткая характеристика волокнистого керамического композиционного материала, разработанного авторами для теплозащитной футеровки поверхностей статорных деталей горячего тракта газотурбинного двигателя. Сделан обзор конструкторских и технологических подходов к системам крепления футеровки к подложке, выработанных в практической работе, позволяющих обеспечить простоту и доступность производственных процессов, а также функциональную достаточность и надежность в эксплуатации. Рассмотрены испытания систем крепления футеровки, обоснован выбор видов испытаний. Сделан вывод о работоспособности предложенных конструкций и технологий и о возможности применения разработок к другим керамическим материалам.

The system of fastening a heat-protective lining made of highly porous ceramic fiber composite to a metal substrate

A.A. Petukhov, N.Y. Filatov
“SRIE”, branch of the JSC “UEC”, Moscow, Russia

A brief description of the fibrous ceramic composite material developed by the authors for the heat-protective lining of the surfaces of the stator parts of the hot gas path of the gas turbine engine is given. An overview of design and technological approaches to lining fastening systems to the substrate, developed in practical work, allowing for simplicity and accessibility of production processes, as well as functional sufficiency and reliability in operation is made. Tests of lining fastening systems are considered, the choice of types of tests is justified. The conclusion is made about the operability of the proposed structures and technologies, and about the possibility of applying the developments to other ceramic materials.

Материал теплозащитной футеровки – высокопористый волокнистый оксид-оксидный композит (ВОК-А). Армирующий компонент – хаотически ориентированные дискретные алюмосиликатные (муллитовые) волокна. Матрица корундовая, создается в виде отдельных перемычек или мостиков, соединяющих волокна между собой в местах их соприкосновения. Условная пористость материала

50...70%, плотность 0,8...1,5 г/см³. Макроструктура под увеличением имеет сходство с войлоком.

Вследствие такой структуры материал имеет очень низкую теплопроводность и очень высокую термостойкость. Эти свойства, а также низкая плотность и высокая химическая инертность делают ВОК-А привлекательным для применения в горячем тракте газотурбинного двигателя (ГТД), в частности,

для создания неохлаждаемой жаровой трубы (ЖТ) камеры сгорания (КС).

Однако из-за такой макроструктуры ВОК-А обладает невысокой общей и контактной прочностью. Эта особенность требует специального подхода к способам крепления футеровки на поверхности металлических стенок, особенно с учетом существенно более низкого коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР) по сравнению с материалом подложки.

Работы по футерованию на начальном этапе были ориентированы на трубчатую КС.

На трактовую поверхность трубы приваривали сетку, в которую втирали сырой пастообразный материал (тесто) ВОК-А, и затем формировали слой футеровки заданной толщины. Таким образом, получали распределенное неразъемное соединение футеровки с подложкой. После сушки спекали горелкой поверхностный слой футеровки. Этот вариант был испытан, работоспособность такой системы обеспечивалась сравнительно высокой податливостью неспеченного слоя футеровки в зоне соединения с металлом и главным образом геометрией объекта, обеспечивающей невозможность какого-либо смещения футеровки.

Попытки применить такой подход к изделиям плоской формы или с маленькой кривизной были неудачны, футеровка не выдерживала напряжений среза, возникающих в плоскости соединения с подложкой при нагревании. Геометрия ЖТ кольцевых КС относится к таким изделиям, также как и зона уплотнения радиального зазора турбины, где можно использовать надроторные вставки из ВОК-А.

Исходя из этого были сформулированы требования к системе крепления, выполнение которых обеспечивало надежную и длительную эксплуатацию футеровки:

- футеровка должна изготавливаться из отдельных элементов небольшого размера для снижения термомеханических напряжений;

- каждый футеровочный элемент после закрепления должен иметь возможность перемещаться в плоскости подложки во всех направлениях в пределах не меньших, чем относительное тепловое перемещение границ элемента и соответствующего ему участка подложки при максимально возможной в эксплуатации разнице температуры;

- должно быть исключено свободное перемещение футеровочного элемента в нормальном по отношению к подложке направлении;

- необходимо предотвратить прямой контакт металлической подложки с композитом, ввиду его невысокой контактной прочности, во избежание

истирания при тепловых перемещениях;

- для снижения локальных контактных напряжений при установке футеровочных элементов, а также для компенсации снижения натяга крепежных элементов при нагреве нужно устанавливать упругодеформирующиеся прокладки.

Были разработаны два способа реализации системы крепления, которые соответствуют указанным выше требованиям.

Первый способ основан на закреплении с помощью проволоки, которая проходит через каналы в теле футеровочной плитки, концы ее пропущены через отверстия в подложке и закреплены на внешней стороне подложки (стенки ЖТ). Каналы могут быть сформированы либо сверлением заготовки, с последующим упрочнением их поверхности, либо с использованием закладных элементов – отрезков алундовой трубки, уложенных в пресс-форму перед формованием заготовки футеровочной плитки.

Этот способ пригоден для тонких подложек, поскольку необходимо выполнить в них большое количество отверстий. При этом он позволяет закрепить футеровку на поверхности практически любой формы, с кривизной любого знака и порядка.

Проработаны два варианта этого способа. В первом варианте используют толстую проволоку, натяжение и закрепление которой выполняют загибом свободных концов через опоры, установленные над отверстиями с обратной стороны подложки. Во втором варианте используют U-образные петли из более тонкой проволоки, которые через небольшие проемы заводят в канал и фиксируют с помощью введенного в канал металлического стержня. При монтаже футеровки свободные концы петель выводят через отверстия на внешнюю сторону подложки и скручивают, обеспечивая натяг и фиксацию.

Второй способ закрепления основан на применении г-образных профилированных крепежных элементов из тонколистового металла (фольги), приваренных к подложке, и пазов, выполненных в боковых противоположных гранях футеровочных плиток, параллельно их опорной поверхности. При монтаже футеровки плитки прижимают к подложке и заводят между крепежными элементами так, чтобы края крепежных элементов заходили в пазы, фиксируя плитку.

Данный способ может быть реализован при одностороннем доступе к подложке, а также на толстых подложках, поскольку не требуется их перфорация.

Но требования к геометрии подложки здесь более жесткие, чем в первом способе: могут использоваться плоские, цилиндрические и конические поверхности.

Впрочем, этот набор достаточен, чтобы получить нужную геометрию ЖТ КС любого типа. В связи со спецификой технологии футерования по этому способу есть ограничения на технологию сборки ЖТ: невозможно футеровать полностью собранную ЖТ, она должна собираться из уже футерованных секторов и сегментов стенок. Соответственно, конструкцию ЖТ целесообразно сделать разборной, чтобы при необходимости можно было заменить футеровочные блоки.

Испытания систем крепления футеровки проводили по следующим параметрам:

- на устойчивость к длительным вибронагрузкам: 1500 ч;
- на устойчивость к перемещениям при высокой температуре: 50 тыс. циклов;
- на устойчивость к высокоамплитудным вибронагрузкам: перегрузка более 300 g.

Вибронагрузки являются основным видом механического воздействия на систему крепления футеровки.

Динамическое воздействие газового потока не является значимым, поскольку в камере сгорания скорости потоков невелики, а в турбине направление потока тангенциально поверхности футеровки. Температурным и коррозионным воздействием газового потока тоже можно пренебречь, поскольку крепежные элементы защищены слоем футеровки.

Для проверки работоспособности систем крепления в условиях турбины на специально разработанном для этого стенде были проведены испытания длительностью 1512 ч на режиме, соответствующем максимально допустимым значениям параметров вибрации (частоты и виброскорости) задней опоры ГТД (300 Гц, 40 мм/с). Испытания прошли успешно, для обоих способов крепления ослабления и разрушения элементов крепежа не обнаружилось.

Также были проведены испытания, имитирующие тепловые перемещения системы образец – подложка, которые появляются в результате большой разницы в КЛТР между ВОК-А и материалом подложки. Вместо тепловых перемещений образца создавали механические перемещения, используя внешний привод. В этом качестве использовали стенд для усталостных испытаний, на статорной части которого был закреплен испытуемый образец (футеровочная плитка и система ее крепления на подложке). В плитку

был вклеен стержень, к которому прилагалось усилие для перемещения плитки относительно подложки. Усилие создавалось стойкой, установленной на динамической части стенда, которая посредством паза подвижно, но без зазора, соединялась со стержнем.

Амплитуда колебаний стенда была $\pm 0,2$ мм, что заведомо превышало амплитуду тепловых перемещений, частота колебаний была 10 Гц. Для того, чтобы снять вопросы о влиянии температуры, испытательный образец был помещен в печь, нагретую при испытаниях до 700°C.

Такой подход позволил быстро, за 1,5 ч, набрать планируемые 50 тысяч циклов перемещений, тогда как традиционные термоциклические испытания с нагревом образцов горелкой длились бы не менее 2000 ч.

Для выяснения предельных возможностей футеровки из ВОК-А и системы ее крепления противостоять вибрационным нагрузкам образец был закреплен на металлической пластине, консольно зафиксированной на вибростенде. Испытания проводились на резонансной частоте (175 Гц), на полной мощности стенда, перегрузка на образце составляла 327 g. Испытания длились 1 ч, были остановлены из-за перегрева стенда. Никаких повреждений образца и системы закрепления не выявлено.

Заключение

Авторы попытались сформулировать и обобщить некоторые конструкторские и технологические приемы монтажа, или закрепления, элементов теплозащитной футеровки на металлических подложках, выработанные в процессе практической деятельности. Многие из сказанного здесь применимо не только к высокопористому волокнистому оксид-оксидному композиту, с которым авторы работают, но для любых керамических материалов, работающих в условиях высоких температур, футеровка из которых должна быть расположена на металлической подложке.

Обоснованность этих приемов подтверждается, по мнению авторов, проведенными испытаниями и полученными в них положительными результатами, по крайней мере, по тем параметрам, которые представлялись авторам важными с учетом условий эксплуатации объектов.