

УДК 629.786.085

**Г.А. ФРОЛОВ¹, В.П. СОЛНЦЕВ¹, С.М. СОЛОНИН¹, С.В. БУЧАКОВ¹,
Ю.И. ЕВДОКИМЕНКО¹, В.М. КИСЕЛЬ¹, А.М. ПОТАПОВ², В.Г. ТИХИЙ²**¹*Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины*²*ГП Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля, Днепропетровск, Украина*

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Получены результаты высокотемпературных испытаний металлической тепловой защиты, предназначенной для многоразовых космических систем. Показано, что благодаря образованию на поверхности защитной окисной пленки материал может длительно работать в условиях конвективного и радиационного нагрева. Определена излучательная способность поверхности материала. После 20 минутного нагрева при температуре 1100 °С ее значение повышается до 0,9 и в дальнейшем остается неизменным. Ресурсные испытания образцов размером 100x100 мм при радиационном нагреве подтвердили возможность использования разработанного сплава в качестве одного из основных материалов для создания систем тепловой защиты.

теплозащитное покрытие, высокотемпературный нагрев, ресурс работы, излучательная способность, многоразовая космическая система, никель-хромовый сплав

Введение

Широкий диапазон температур и условий работы тепловой защиты на различных участках поверхности многоразовой космической системы (МКС) предъявляет повышенные требования к материалам для ее изготовления. Наряду с неметаллическими материалами, которые в основном применялись для теплозащитных покрытий (ТЗП) МКС «Шаттл» и «Буран» все большее внимание уделяется разработке металлических систем тепловой защиты. Достаточно подробно конструкции систем многоразовой тепловой защиты рассмотрены в [1].

В настоящее время наиболее перспективными считаются сплавы на никелевой (PM-1000) и железной основе (PM-2000). В ИПМ НАН Украины совместно с ГП «КБ «Южное»» разработан модифицированный сплав на никелевой основе, получивший название ЮИПМ.

1. Формулирование проблемы

Теплозащитное покрытие должно удовлетворять следующим требованиям:

- выдерживать в течение более 20 минут температуру на поверхности 1100 °С (не менее 100 циклов нагрева);
- обладать высокой излучательной способностью ($> 0,85$);
- противостоять термическим, механическим, акустическим и вибрационным нагрузкам;
- иметь малый удельный вес на единицу поверхности ($\sim 10 \text{ кг/м}^2$);
- обеспечивать температуру на конструкции МКС не выше 200 °С и т.п.

Высокотемпературные испытания таких покрытий являются одним из основных условий, которое необходимо обеспечить при разработке теплозащитных материалов многократного использования.

2. Решение проблемы

2.1. Сплав для металлической тепловой защиты

При разработке сплава ЮИПМ были проведены исследования наиболее перспективных материалов на основе нихрома. Наиболее устойчивым при циклическом печном нагреве оказался сплав Х20Н80,

практически соответствующий составу РМ-1000 по основным компонентам – никелю и хрому. Однако было установлено, что жаростойкость сплава заметно зависит от технологии его получения. Как правило, у сплавов этой группы поверхностное разрушение связано с отслоением защитной окисной пленки и последующим повторным окислением обнажающейся поверхности. Основной причиной недостаточного ресурса работы материалов этого класса, по-видимому, является несовершенство технологии их получения. В материал попадает большое количество элементов внедрения – азота и кислорода, которые остаются в материале после спекания. Это существенно снижает низкотемпературную пластичность и жаропрочность материала в области температур 800–900°C. Целый ряд других недостатков существующей технологии, основанной на механохимическом синтезе, отрицательно сказывается на стабильности физико-механических и функциональных свойств конечного продукта.

В связи с этим была разработана лабораторная технология, исключая недостатки механохимического синтеза. Для получения материала применяются высокодисперсные порошки исходных компонентов. За счет термохимического воздействия процесса спекания происходит ускоренная гомогенизация, а также связывание примесей внедрения в прочные соединения. Применение высокой степени деформации и промежуточных отжигов позволяет получить гомогенный продукт с равномерно распределенной дисперсноупрочняющей добавкой – окисью иттрия. Это приводит к тому, что защитная пленка не отслаивается и отсутствует унос массы, связанный с возникновением термических напряжений при термоциклировании. Эксперименты показали, что после 14–18 циклов нагрева-охлаждения материал перестает окисляться, не наблюдается ни прироста, ни уноса массы.

По разработанной технологии были изготовлены заготовки, из которых путем холодной и горячей

прокатки были получены листы различной толщины. Для испытаний были изготовлены образцы $\varnothing 15$ мм и толщиной от 0,3 мм до 2,5 мм, а также пластины размером 100x100 мм и толщиной 1,7 мм.

2.2. Методики и установки для проведения высокотемпературных испытаний

Испытания проводились на гелиоустановке СГУ-7 и установке конвективного нагрева ГВО-2. Основным элементом гелиоустановки СГУ-7 является фасетный концентратор солнечной энергии $\varnothing 5$ м. Установка оснащена системой непосредственного слежения за Солнцем. Диаметр фокального пятна для получения на поверхности образца температуры до 1250 °С с неоднородностью распределения светового потока $\sim 10\%$ составляет порядка 160 мм. На этой установке проводились ресурсные испытания образцов размером 100x100 мм с замером распределения температуры по толщине теплозащитного пакета (рис. 1).



Рис. 1. Ресурсные испытания металлической тепловой защиты на установке СГУ-7

Стенд конвективного нагрева, обеспечивающий нагрев образцов в струе продуктов сгорания, включает в себя системы подачи жидкого горючего (керосина), газообразного горючего (водорода), сжатого воздуха, кислорода, а также системы крепления и перемещения образцов, запуска, измерений, видеонаблюдения и дистанционного управления.

Для испытания образцов металлической теплозащитной защиты применялось горелочное устройство ГВО-2, работающее на топливной паре керосин – воздух, со следующими параметрами:

- диаметр критического сечения сопла 11 мм;
- давление в камере сгорания до 0,8 МПа;
- коэффициент избытка окислителя 1,75;
- температура торможения 1530 К;
- скорость на срезе сопла 1115 м/с.

Ресурсные испытания образцов теплозащитных материалов представляют собой последовательность циклов нагрева до 1100 °С, каждый длительностью 20 минут. После каждого цикла нагрева контролируется масса образца (взвешивание производится на аналитических весах ВЛА-20г-М с точностью ±0,2 мг) и внешний вид нагреваемой поверхности. Испытания продолжаются до стабилизации массы образца (наиболее благоприятный результат) либо до стабилизации потери массы вследствие окисления и уноса продуктов окисления потоком. Для таких испытаний образец исследуемого материала представлял собой диск диаметром Ø 15 мм и толщиной до 3 мм.

Для определения температуры и излучательной способности поверхности исследуемых образцов применялся пирометр INFRATHERM Converter IGA 100 компании IMPAC Electronic GmbH. Прибор позволяет проводить измерения значений коэффициента черноты в пределах от 0,2 до 1,0 для длины волны $\lambda = 1,45...1,8$ мкм. Погрешность измерений при температурах до 1500 °С составляет 0,3 % и 0,5% при температурах свыше 1500 °С, частота измерений – 5 измерений в секунду. Данные, полученные при измерении температуры, обрабатываются с помощью компьютерной программы и выдаются в виде таблиц и графиков.

Для измерения истинной температуры образца используется хромель-алюмелевая термопара, которая устанавливается на задней поверхности образца. Путем измерений температуры на обеих поверхностях образца в условиях одностороннего было пока-

зано, что при стационарном нагреве до 1100 °С температуры на нижней и верхней поверхностях образца отличаются не более, чем на 5 градусов. На столько же занижает показания пирометра наличие на нем защитного стекла. Поэтому можно считать, что оба фактора взаимно компенсируются.

В процессе нагрева производится одновременная запись показаний пирометра и ЭДС термопары. Значение коэффициента излучательной способности рассчитывается по формуле:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} = \frac{1}{C_2} \ln \varepsilon(l, T),$$

где T – температура, измеренная термопарой; T_1 – температура, измеренная пирометром; l – длина волны пирометра (1,625 мкм), C_2 – пирометрическая константа ($C_2 = 1,438 \times 10^{-2}$ м·К); $\varepsilon(l, T)$ – коэффициент излучения, рассчитанный для соответствующих значений температуры и длины волны.

Для расчета берутся данные измерений, полученные в условиях сохранения заданного уровня температуры в течение не менее 10 секунд для выравнивания температурного поля в образце.

2.3. Результаты высокотемпературных испытаний

Регулировка режима газогенератора позволяла поддерживать температуру на поверхности образца с точностью 1100 ± 30 °С. Для проверки влияния механической обработки (прокатки) на характеристики образцов из сплава ЮИПМ были испытаны образцы двух видов: образец (толщина 2,5 мм), полученный только прессовкой и образец (толщина 0,3 мм), полученный из прокатанной заготовки. В результате испытаний было установлено, что если потеря массы прессованного образца пористостью 8 % за цикл нагрева равна ~0,1%, то потеря массы образца, полученного из прокатанной заготовки, примерно в 10 раз меньше. Можно предположить, что благодаря значительному повышению жаростойкости сплава ЮИПМ после прокатки потеря массы образца, испытанного даже в условиях динамического воздей-

ствия сверхзвуковой струи газогенератора, за 100 циклов нагрева не должна превысить 1%.

Исследование излучательной способности образцов из сплава ЮИПМ при температуре 1100 °С с помощью пирометра INFRATHERM Converter IGA 100, показало, что степень черноты неокисленной поверхности образца в диапазоне длин волн 1,4–1,85 мкм составляет $0,78 \pm 0,05$. После 20 минутного нагрева в струе газогенератора ее значение повышается до $0,92 \pm 0,02$ и остается неизменным. Определенная по предложенной методике степень черноты образца из нихрома (Ni-20Cr) при температуре 1000 °С составила $\varepsilon = 0,78 \pm 0,03$, что хорошо согласуется с литературными данными и подтверждает хорошую точность полученных результатов.

Ресурсные испытания металлической пластины из сплава ЮИПМ размером 100x100 мм, толщиной 1,7 и начальным весом 143,9 г. были проведены на гелиоустановке СГУ-7. Через 20 циклов нагрева с выдержкой при температуре 1100 °С по 20 минут ее вес составил 144 г. Эти эксперименты подтвердили работоспособность разработанного сплава на образцах с размерами близкими к натурным.

Для объяснения удовлетворительной работоспособности сплава ЮИПМ был выполнен рентгеноструктурный и металлографический анализы. Анализ рентгенограмм прокатанных образцов, проведенный до их испытаний, показал, что линии промышленного нихрома имеют значительное большую ширину по сравнению с линиями сплава ЮИПМ. Это свидетельствует о большей степени гомогенности предложенного сплава, которая объясняется воздействием на его структуру горячей обработки давлением в процессе прокатки.

Сравнение рентгенограмм образцов, изготовленных из промышленного нихрома и сплава ЮИПМ, после испытаний показало, что оксидная пленка на промышленном сплаве образована в ос-

новном оксидом никеля (NiO), а пленка сплава ЮИПМ состоит главным образом из шпинели (NiCr₂O₄). По-видимому, с этим и связана большая стойкость против окисления сплава ЮИПМ, поскольку известно, что никель-хромовая шпинель обладает более высокими защитными свойствами, чем оксид никеля.

Полученные данные были подтверждены результатами металлографического анализа. Были обнаружены следующие различия в морфологии оксидной пленки и ее адгезии к основе:

- на образце промышленного нихрома пленка рыхлая, имеет слабое сцепление с основой и отслаивается от нее, образуя большие пустоты;
- на образце сплава ЮИПМ пленка более плотная и непрерывная, о хорошей адгезии пленки к основе свидетельствует отсутствие видимой границы раздела между пленкой и основой.

Заключение

Проведенные высокотемпературные испытания свидетельствуют о существенном повышении свойств разработанного сплава и, соответственно, эффективности разработанной лабораторной технологии. Полученный жаростойкий материал обладает необходимым комплексом свойств и в настоящее время является одним из лучших по показателям физико-механических и служебных свойств.

Литература

1. Гофин М.Я. Жаростойкие и теплозащитные конструкции многоразовых космических аппаратов. – М.: ЗАО «ТФ «МИР», 2003. – 672 с.

Поступила в редакцию 1.06.2008

Рецензент: академик НАН Украины В.В. Скороход, Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Киев.