

УДК 536.3:681.586.5

Г. Ф. Горностаев

Институт проблем матеріалознавства ім. І. Н. Францевича Національної академії наук України, Київ

## Стендовые испытания теплозащиты при лучистом нагреве

Надійшла до редакції 22.06.07

Експериментальним шляхом підтверджено ефект накопичення тепла у поверхневому шарі теплозахистного матеріалу при підвищенні його температури, а також явище перевипромінювання поверхнею ТЗМ променевої енергії, котра не була поглинута матеріалом. Запропоновано метод оцінки температури поверхні ТЗМ волоконно-оптичним датчиком, який не потребує застосування об'єктора.

### ВВЕДЕНИЕ

При входе космического аппарата в плотные слои атмосферы со второй космической скоростью интенсивность лучистого нагрева поверхности теплозащиты становится соизмеримой с уровнем конвективного теплового потока. Это обуславливает необходимость разработки средств и методов [10] исследования разрушения теплозащиты в условиях лучистого нагрева, моделирующих натурные условия работы космического аппарата. В данной работе проведены результаты исследования процессов разрушения теплозащитных материалов с помощью волоконно-оптических датчиков двух типов: при торцевом освещении оптоволоконна и при боковом освещении оптоволоконна. Испытания проводились на гелиоконцентраторе СГУ-4 с диаметром зеркала 2 м и на установке «Уран» с ксеноновой лампой, установленной в центре зеркала диаметром 0.6 м. Максимальное значение лучистого теплового потока составляло  $9.2 \text{ МВт/м}^2$  на установке СГУ-4, что примерно соответствует условиям входа баллистических систем, для которых были выполнены стендовые испытания материалов по заказу ЦКБМ (Россия).

### ПРИМЕНЕНИЕ ДАТЧИКА

#### С ТОРЦЕВЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ ОПТОВОЛОКНА

Задача численного расчета величины подводимого радиационного теплового потока (РТП) значительно усложняется, поскольку для этого необходимо знать термодинамические и оптические свойства газовой смеси в каждой точке слоя за скачком уплотнения, а также тепловые нагрузки в любой точке поверхности.

Анализ результатов [2, 4], полученных при испытании датчиков радиационного теплового потока со сквозным световодом в условиях радиационного нагрева (на солнечном концентраторе СГУ-4), свидетельствует о наличии трех характерных точек, определяющих динамику изменения величины светового потока на выходе «сквозного» световода в процессе его теплового разрушения (рис. 1).

Собственное излучение горячего торца оптоволоконна  $J_{\text{св}}$  можно определить из соотношения

$$J_{\text{св}} = J_{\text{фпз}} - J_{\text{л}} \tau^*$$

где  $J_{\text{фпз}}$  — световой поток на фотоприемник после стабилизации сигнала (рис. 1, точка 3),  $\tau^*$  — пропускание оплавленного световода,  $J_{\text{л}}$  — падающий лучистый поток.

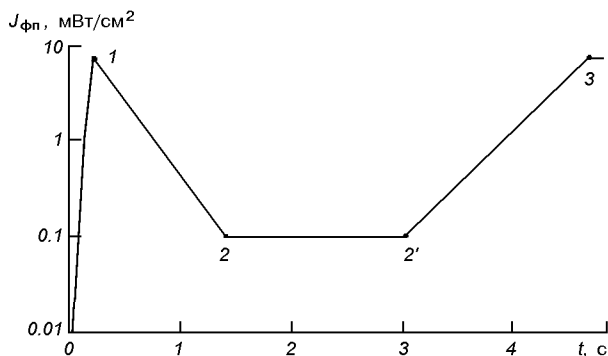


Рис. 1. Изменение светового потока  $J_{\text{фп}}$  на фотоприемник (установка СГУ-4,  $J_w = 9.2 \text{ МВт/м}^2$ , торцевое освещение сквозного световода)

Наличие участка  $1-2-2'-3$  (рис. 1) можно объяснить тем, что константа теплового разрушения [9], которая определяет количество тепла, накапливаемого на участке  $1-2$  в поверхностном слое материала в процессе повышения температуры от начала разрушения (плавления) в точке 1 до ее стабилизированного значения (в точке 3) играет фундаментальную роль [11] в процессах прогрева и уноса массы теплозащитного материала (ТЗМ). Она определяет закономерности перемещения поверхностных изотерм, нестационарного уноса массы и изменения температуры поверхности ТЗМ, а также объясняет наличие провала амплитуды сигнала на участке  $1-2$ .

Петрографический анализ оплавленных световодов показал, что пленка расплава на торце состоит из трех стекол, соответствующих материалу жилы, оболочки и продукту их взаимодействия. Показатель преломления этой пленки оказался средним между показателем преломления оболочки и жилы световода:

$$n_{\text{об}} = 1.450, \quad n_{\text{пл}} = 1.457, \quad n_{\text{ж}} = 1.463.$$

Потери энергии на термически разрушаемом торце и цилиндрической составляющей световода имеют сложный характер зависимости от структурных изменений поверхности, длины волны, времени, среды и т. д., поэтому теоретическое определение пропускания оплавляемого световода весьма затруднено [7]. Имея экспериментально определенное значение  $\tau^* = 0.1\tau$ , ( $\tau$  — пропускание холодного световода) на стенде СГУ-4 с помощью датчиков со сквозными

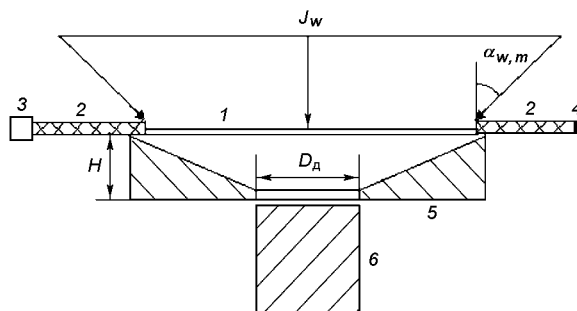


Рис. 2. Схема расположения распределенного датчика на установке «Кристалл-М»: 1 — кварцевая сердцевина оптоволоконка, 2 — оптоволоконно, 3 — фотоприемник, 4 — черный лак, 5 — диафрагма, 6 — ТЗМ,  $D_d$  — диаметр диафрагмы,  $J_w$  — падающий лучистый поток,  $\alpha_{w,m}$  — максимальный угол падения пучка лучей,  $H$  — высота диафрагмы

световодами осуществлялся контроль изменения падающего потока  $J_w$  в процессе линейного уноса различных теплозащитных материалов при  $J_w \leq 9.2 \text{ МВт/м}^2$ : асбо- и стеклопластиков, сублимирующих материалов.

#### ПРИМЕНЕНИЕ ДАТЧИКА С БОКОВЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ ОПТОВОЛОКНА

С помощью распределенного волоконно-оптического датчика (рис. 2) антенного типа [3] был обнаружен эффект переизлучения нагреваемой поверхностью ТЗМ лучистой тепловой энергии, которая не была поглощена материалом.

Для контроля режима лучистого нагрева образцов был использован датчик РТП из гибкого оптоволоконка диаметром 1 мм системы кварц-полимер с диаметром кварцевого сердечника около 0.4 мм. На участке 1 гибкого световода были сняты обе полимерные оболочки и кварцевая сердцевина освещалась излучением ксеноновых ламп.

Эксперименты проводили на установке лучистого нагрева «Кристалл-М» (ИПМ НАНУ) с тремя зеркальными концентраторами диаметром 0.6 м, оснащенными десятикиловаттными ксеноновыми лампами. Оси концентраторов были расположены под углом  $120^\circ$  к оптической оси установки. Датчик размещали над водоохлаждаемой диафрагмой. Аналоговый сигнал датчика

РТП выводился на экран персонального компьютера вместе с показаниями термопары, расположенной в исследуемом материале.

Основные потери в кварцевом оптоволокне (ОВ) вызваны упругим рэлеевским рассеянием, при котором не происходит изменение длины волны. Подводимое излучение возбуждает мелкомасштабные неоднородности в волокне, которые действуют как вторичные индуцированные дипольные излучатели, генерирующие излучение в широком угловом спектре. Световод с конечной числовой апертурой захватывает часть рассеянного излучения и канализирует его по направлению к торцам световода. Излучения от каждого элементарного рассеивателя суммируются векторно [6].

Для режимов постоянного интенсивного нагрева образца ТЗМ снижение температуры  $T_w$  поверхностного слоя Ti-Al (вследствие плавления Al) сопровождалось увеличением лучистого потока  $J_T$  от поверхности ТЗМ к сердцевине оптоволокна (рис. 3).

Аналогичный эффект был также ранее обнаружен с помощью световодного датчика радиационного теплового потока на границе шлак-металл в процессе выплавки слитка в кристаллизаторе установки электрошлакового переплава [9]. Это свидетельствует об общности данного процесса при высокоинтенсивном нагреве и плавлении различных материалов.

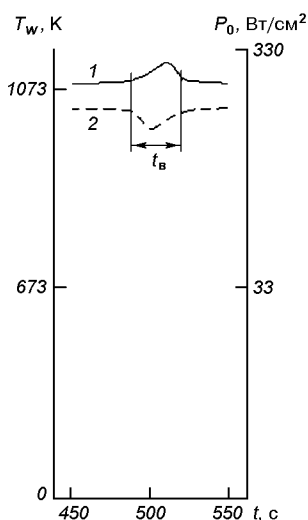


Рис. 3. Изменение лучистого потока  $P_0$  (1), а также температуры (2) поверхности образца Ti — Al на установке «Кристалл-М»;  $t_B$  — время «высвечивания» поверхности ТЗМ

#### ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА

Известны методы измерения температуры материала при торцевом освещении оптоволокна [1].

С целью применения распределенного датчика (рис. 2) с боковым освещением оптоволокна для оценки температуры поверхности ТЗМ в процессе лучистого нагрева на установке «Уран» были проведены одновременные измерения показаний распределенного датчика РТП и термопары, установленной под нагреваемой поверхностью образца из графита.

Целью создания распределенного датчика температуры поверхности ТЗМ является упрощение применяемой ранее методики испытаний ТЗМ при лучистом нагреве, которая использовала механическое затемнение нагреваемой поверхности образца теплозащитного материала с помощью вращающегося obtюратора.

На рис. 4 представлен результат градуировки распределенного датчика по температуре поверхности графитового образца, выполненной в режиме остывания материала (после выключения ксеноновой лампы на установке «Уран»).

В качестве фотоприемника использовался германиевый фотодиод, имеющий максимальную чувствительность в диапазоне длин волн

$$\lambda_{\max} = 1.4 \dots 1.65 \text{ мкм.}$$

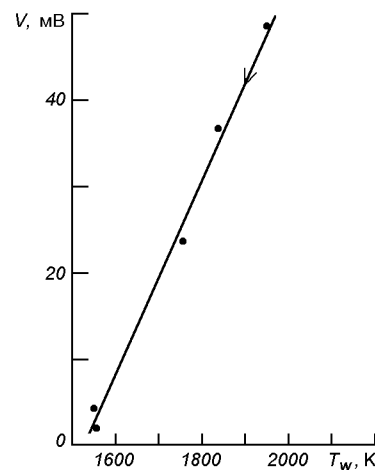


Рис. 4. Выходное напряжение  $V(J_T)$  распределенного датчика, полученное при остывании графитового образца на установке «Уран» после выключения лампы

Вторичными излучателями являлись микродефекты в стекле оптоволокон.

Сравнительно небольшой вклад в общие потери вносит поглощение при взаимодействии фотонов с электронами или с колебательными состояниями основных компонентов материала сердцевины световода. Для кварца это поглощение существенно возрастает при  $\lambda > 1.7$  мкм и для УФ-области спектра. Минимум потерь в кварцевых световодах определяется только фундаментальными механизмами, а не примесями и дефектами, и приходится на спектральную область 1.2—1.7 мкм.

Считается, что затухание света в среде  $\text{SiO}_2$  происходит только вследствие рассеяния на неоднородностях. Современные ОВ изготавливаются из веществ, в которых размер неоднородностей много меньше длины волны. К ним относятся пространственные флуктуации показателя преломления порядка размера молекул, а также сами молекулы.

Мощность рэлеевского рассеяния в чистом веществе согласно [8] составляет

$$P = P_0 \frac{\sigma T}{\lambda_0} \beta \left( \rho n \frac{dn}{d\rho} \right)^2,$$

где  $T$  — абсолютная температура,  $\lambda_0$  — длина волны излучения,  $\sigma$  — постоянная Больцмана,  $\beta$  — сжимаемость,  $n$  — показатель преломления,  $P_0$  — мощность подводимого излучения,  $\rho$  — плотность вещества.

Часть рассеянной энергии, перехватываемая оптическим волокном, определяется по формуле [5]

$$Q = \frac{M^2}{4n_{10}},$$

где  $M$  — числовая апертура оптоволокон,  $n_{10}$  — показатель преломления сердцевины.

Плотность светового потока на фотоприемнике  $J_\phi$  определяется как произведение эффективного коэффициента пропускания  $\tau_s$  сердцевины оптоволокон на подводимый к датчику лучистый поток  $P_0$ :

$$J_\phi = P_0 \tau_s.$$

На рис. 5 представлена зависимость величины поправки  $\Delta V(I_n)$ , которую необходимо вычитать из амплитуды сигнала  $V(J_\phi)$  датчика при проведении измерений температуры материала в ре-

жиме нагрева образца на установке «Уран»:

$$V(T_w) = V(J_\phi) - \Delta V(I_n).$$

Это необходимо для того, чтобы выделить амплитуду сигнала датчика, обусловленную только нагретой поверхностью ТЗМ.

Зависимость, представленная на рис. 5, получена путем сравнения показаний датчика при одинаковой температуре  $T_w$  для двух режимов: режима нагрева и режима остывания образца после выключения лампы.

Величина  $\Delta V(I_n)$  определяет величину выходного напряжения фотодиода, обусловленную только излучением ксеноновой лампы, падающим на боковую поверхность кварцевой сердцевины оптоволокон (рис. 3).

Сравнительно большая плотность лучистого потока, которую способны пропустить через себя современные кварцевые оптоволокон, объясняется их высокой прозрачностью в спектральной области излучения Солнца или искусственных имитаторов, например ксеноновых ламп.

Современные оптоволокон изготавливаются главным образом из химически чистого  $\text{SiO}_2$ , в который при необходимости добавляют соответствующие присадки. Они содержат небольшую составляющую гидроксильной группы ОН, заметно поглощающую на длинах волн 1.378...1.41 мкм.

Рэлеевское рассеяние обусловлено мелкомасштабными (по сравнению с длиной волны) флуктуациями плотности или химического состава вследствие неравновесных состояний, возникающих в момент стеклования. Результирующие неоднородности вызывают почти изотроп-

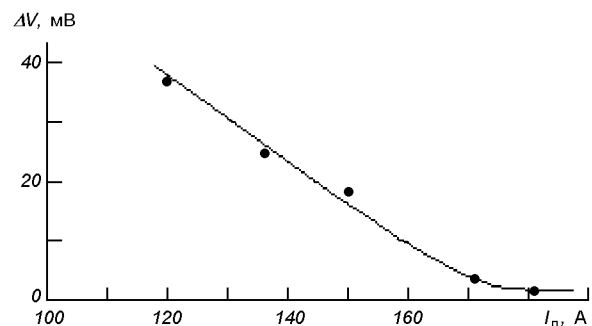


Рис. 5. Поправка  $\Delta V(I_n)$ , вычитаемая из показаний распределенного датчика температуры в режиме нагрева графитового образца на установке «Уран» в зависимости от тока  $I_n$  накала лампы

ное рэлеевское рассеяние ( $\lambda \leq 1.55$  мкм), которое распространяется по направлению к торцу оптоволокну, на котором установлен инфракрасный германиевый фотодиод, регистрирующий рассеянный на микродефектах оптоволокну поток излучения, пропорциональный температуре поверхности образца ТЗМ.

#### ВЫВОДЫ

1. С помощью волоконно-оптических датчиков с торцевым и боковым освещением оптоволокну на стендах лучистого нагрева ИПМ НАНУ обнаружены эффекты накопления тепла в поверхностном слое ТЗМ и «высвечивания» (переизлучения) лучистого потока разрушаемой поверхностью ТЗМ во внешнее пространство.

2. Разработан метод оценки уровня температуры поверхности ТЗМ в условиях лучистого нагрева с помощью распределенного волоконно-оптического датчика. Метод исключает необходимость использования механического obturator, что значительно упрощает процесс проведения температурных измерений при лучистом нагреве ТЗМ в стендовых условиях.

1. Бельский О. И., Свет Д. Я., Шиш Ю. И. Измерение температуры ванны жидкого металла в конверторе световодным устройством // Объективные методы пирометрии излучения металлов. — М.: Наука, 1976.— С. 177—183.
2. Горностаев Г. Ф., Пасичный В. В., Ткаченко Г. В. Метод измерения лучистой составляющей теплового потока на поверхности керамической теплозащиты // Космічна наука і технологія.—2006.—12, № 2/3.— С. 98—102.
3. Горностаев Г. Ф., Пасичный В. В., Ткаченко Г. В. Разработка методов диагностики турбогенератора воло-

конно-оптическими датчиками // Промышленная теплотехника.—2007.—29, № 1.—С. 92—100.

4. Горностаев Г. Ф., Теплякова О. А. Применение световодов для выделения лучистой составляющей теплового потока // Порошковая металлургия.—1996.—№ 5/6.— С. 48—51.
5. Горностаев Г. Ф., Фролов Г. А., Пасичный В. В., Ткаченко Г. В. Волоконно-оптическая теплотметрия и ее применение // ИФЖ.—2007.—80, № 3.—С. 180—185.
6. Иванов А. Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. — М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999.—671 с.
7. Окоси Т. Волоконно-оптические датчики: Пер. с япон. — Л.: Энергоатомиздат, 1991.—256 с.
8. Скляр О. К. Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы. — М.: СОЛОН-Р, 2001.—237 с.
9. Скороход В. В., Фролов Г. А., Горностаев Г. Ф. Аномальная теплопередача на границе шлак—металл в установке электрошлакового переплава // Доп. НАН України.—2004.—№ 7.—С. 90—96.
10. Слезингер И. И. Аппаратура для испытаний носовых частей баллистических ракет при входе в плотные слои атмосферы // Экспресс-информ. Испытательные приборы и стенды.—1978.—№ 23.—С. 17—31.
11. Фролов Г. А. Температура поверхности тела, разрушающегося под действием постоянной тепловой нагрузки // ИФЖ.—1987.—53, № 3.—С. 420—426.

#### BENCH TESTS OF HEAT-SHIELDING AT RADIANT HEATING

*G. F. Gornostaev*

The effect of heat accumulation in the superficial layer of heat-shielding materials during the increase of its temperature was confirmed by an experimental approach. Experimentally, we confirmed the existence of emission of radiation energy which was not absorbed by a material by the surface of heat-shielding materials. We propose the method for the estimation of the temperature of the surface of a heat-shielding material with the use of the distributed fiber-optical gauge not demanding the application of the obturator.