

РАДИАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПРОДУКТОВ РАЗРУШЕНИЯ
МОДЕЛИ, ОБТЕКАЕМОЙ ДОЗВУКОВЫМ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ПОТОКОМ ПЛАЗМЫ

Э. Б. ГЕОРГ, М. И. ЯКУШИН

(Москва)

В дозвуковой струе воздуха, нагретого до $T=8500^\circ\text{K}$, при $p=1$ атм испытывались модели из асбопластика. Возникающий на разрушаемой поверхности модели многокомпонентный тепловой пограничный слой имеет сложную структуру. У поверхности модели, в критической области пограничного слоя, наблюдается подслой протяженностью $1.5\div 2$ мм, где температура газа постоянна, а его состав в достаточной степени неизменен и определяется в основном продуктами разрушения асбопластика.

В этой области получено спектральное распределение интенсивности излучения паров асбопластика в диапазоне $0.3\text{--}0.9$ мк, что дает возможность рассчитать спектральные коэффициенты поглощения для температуры 3500°K .

Излучательная способность паров сравнивается с излучением воздушной плазмы набегающего потока.

1. Многокомпонентный пограничный слой, образующийся на поверхности моделей, помещенных в струю воздушной плазмы, частично экранирует излучение от высокотемпературного ударного слоя. Для определения относительных вкладов в излучение различных спектральных интервалов, экранирующей способности, а также тепловых потоков к поверхности разрушаемого материала важно знать излучательную способность пограничного слоя. Теоретический расчет этой величины затруднен из-за сложного состава пограничного слоя и протекания в нем целого ряда физико-химических процессов [1-3]. Ввиду трудностей математического и вычислительного характера, а также из-за отсутствия четкой физической модели взаимодействия сложного композитного материала с нагретым потоком воздуха при теоретическом анализе рассматриваются упрощенные модели.

Цель данной работы состояла в экспериментальном определении спектральной интенсивности излучения продуктов разрушения в пограничном слое в спектральном интервале $0.3\text{--}0.9$ мк. За основу был выбран метод эмиссионного анализа. Все измерения проводились в квазистационарном режиме разрушения модели.

2. Эксперименты проводились на установке с индукционным нагревом плазмы [4].

Температура нагретого воздуха $T=8500^\circ\text{K}$, электронная концентрация $N_e=3\cdot 10^{15}$ см⁻³, скорость потока $v=30$ м·сек⁻¹, суммарный тепловой поток к разрушаемой модели $q=0.4$ квт·см⁻², диаметр струи $d\sim 40$ мм, давление $p=1$ атм.

Исследовались модели из асбопластика марки АТ, представляющего собой композитный материал, состоящий из наполнителя (асбест) и связующего (фенольно-формальдегидная смола). В состав асбопластика входят элементы С, О, Mg, Si, кроме них имеется незначительное количество легкоионизируемых компонентов. Модель имела форму цилиндра длиной 33 мм и шириной 30 мм. Радиус притупления головной части 15 мм. Температура поверхности разрушающегося асбопластика в потоке воздуха

$T=2800^\circ\text{K}$. Толщина пограничного слоя в этих условиях $\sim 5\text{ мм}$ [5], а его химический состав и распределения концентраций основных компонентов подробно исследованы и представлены в работе [6].

Модели крепились на двухкомпонентном координатнике, который вводился в рабочее сечение струи на высоте $\sim 10\text{ мм}$ от среза трубки. В начальный период асбопластик нагревался как целое. Когда температура поверхности достигала 500°C в материале начиналось основное физическое превращение — термическое разложение связующего. Оно сопровождалось образованием газообразных продуктов и конечного продукта разрушения — кокса. Газообразные продукты разложения в процессе фильтрации нагревались от стенок пор, разлагались на низкомолекулярные продукты и вдувались в пограничный слой, отесняя высокотемпературный набегающий поток газа. Расход газообразных продуктов связан со скоростью перемещения фронта коксования, который обусловлен перемещением внешней поверхности и глубиной прогрева материала. Структура внутреннего слоя материала определяется коксовым остатком, сохраняющим неизменный состав за время испытаний, и зоной пиролиза летучих. Экспериментальное изучение временных зависимостей перемещений поверхности модели и фронта коксования, характеризующих процесс разрушения, показало, что с 30-й секунды эти параметры изменяются линейно, а температура поверхности разрушаемого материала принимает стационарное значение.

Оптическая схема измерений описана в [5]. Спектральные измерения проводились на дифракционном спектрографе ДФС-13 (рабочий диапазон $2000\text{--}10000\text{ \AA}$, дисперсия в первом порядке 2 \AA мм^{-1}). Рабочая ширина щели 6 мм . Это позволило получить измеряемую величину, усредненную по спектральному интервалу 12 \AA .

На фотопластинку одновременно регистрировалось излучение пограничного слоя, разрушаемой модели и плазмы. При регистрации излучения плазмы модель убиралась.

Определение абсолютной интенсивности излучения паров основывалось на методе гетерохромной фотометрии с измерением абсолютной плотности излучения в непрерывном спектре и одиночных линиях.

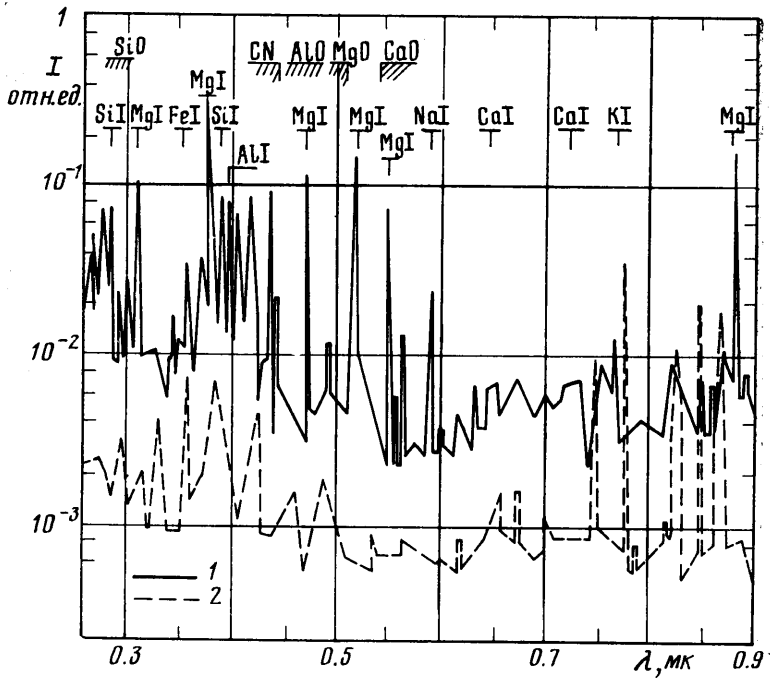
Были сняты спектры излучения паров пограничного слоя в диапазоне $0.2\text{--}0.9\text{ мк}$. В спектре представлены линии всех элементов, присутствующих в исходном материале, а также продукты различных соединений.

Количественные измерения спектральной интенсивности излучения паров проводились в двух сечениях на расстоянии 1 и 2.5 мм от стенки модели. Одно измерение было выполнено на внутренней границе пограничного слоя, на участке с постоянным значением $T=3500^\circ\text{K}$, а второе — в средней части пограничного слоя, в точке $T=4500^\circ\text{K}$ на кривой подъема температуры. Отметим, что в этой области плотность почернения излучения паров уменьшается из-за спада концентрации излучающих компонентов; этим обусловлен выбор второй точки измерения.

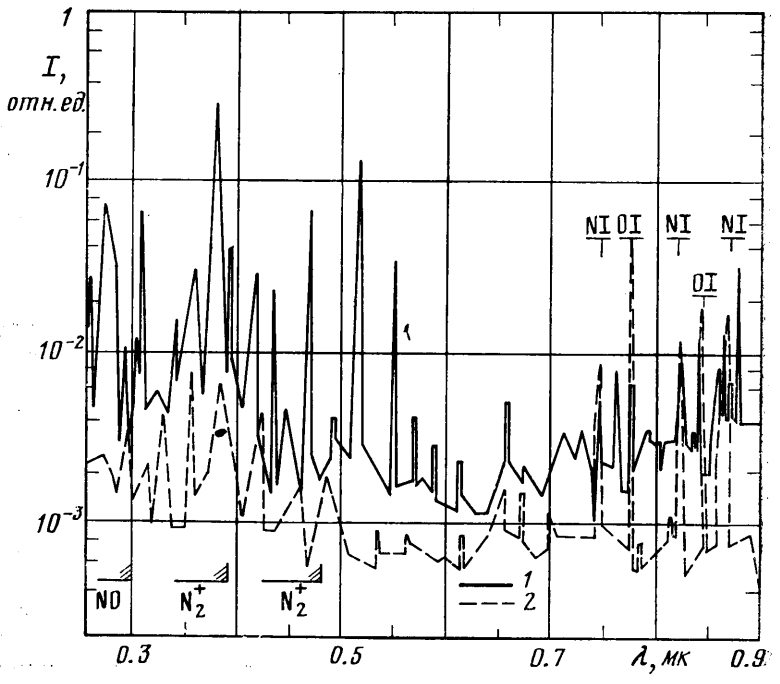
Кроме того, определялась интенсивность излучения невозмущенной воздушной плазмы при $T=8500^\circ\text{K}$.

На фиг. 1 и 2 представлены результаты измерений спектральной интенсивности излучения паров асбопластика в двух сечениях: цифрами 1 обозначены первое и второе сечения пограничного слоя, 2 — набегающий поток воздушной плазмы.

Спектр излучения паров по сравнению с воздушной плазмой имеет более сложную структуру. К особенностям излучения паров следует отнести значительную интенсивность, превышающую интенсивность излучения воздушной плазмы, и ярко выраженный линейчатый спектр. Излучение слоя



Фиг. 1



Фиг. 2

конечной толщины определяется выражением $I=B[1-\exp(-K_\lambda l)]$, где $K_\lambda l$ — оптическая толщина слоя. Как известно, коэффициент поглощения $K_\lambda \sim \sigma_\lambda N$, где σ_λ — сечение поглощения, N — концентрация излучающих компонентов.

Значительную интенсивность излучения паров по сравнению с излучением воздуха, несмотря на меньшую геометрическую толщину паров, можно объяснить высокой концентрацией излучающих компонентов паров, а также большим сечением поглощения этих компонентов [7]. К основному излучателю в пограничном слое следует отнести радикал CN (0.3—0.4; 0.6—1 мк), концентрация которого достигает 10^{16} см⁻³.

Так как измерения абсолютные, можно провести некоторые сравнительные оценки интенсивности излучения различных элементов паров. Как видно из фиг. 1 и 2, наиболее интенсивны линии тех элементов, которые в большем количестве содержатся в исходном состоянии асбопластика (Mg).

Наиболее интенсивны в спектре излучения резонансные линии, если эффекты самопоглощения и самообращения малы (Na, K). Температура определяет степень ионизации, а следовательно, и интенсивность излучения линии. Наиболее интенсивными являются линии атомов, хотя в ультрафиолетовой области наблюдается довольно интенсивное излучение иона магния. Подъем интенсивности в ультрафиолетовой области ($\lambda \sim 0,4$ мк) обусловлен как наличием интенсивного линейчатого спектра, так и излучением молекулярных полос, особенно молекул CN и SiO.

В видимой части спектра наблюдается интенсивное излучение линий атомов Mg и Fe. Излучение же молекулярных полос в этой области незначительно. По мере продвижения в красную область возрастает интенсивность фона, а вклад линейчатого спектра в баланс излучения уменьшается.

В излучении смеси воздуха с продуктами разрушения материала в видимой и близкой к ультрафиолету частях спектра доминирует излучение фиолетовой системы CN. Некоторые элементы (C, O, Si) составляют существенную часть исходного материала, но излучают слабо, так как, видимо, находятся в связанном состоянии.

Сравнение отношений спектральной интенсивности, измеренной в двух сечениях пограничного слоя, к излучению черного тела при соответствующих температурах показывает, что наиболее заметное расхождение наблюдается в спектральном диапазоне 0,6—0,8 мк, которое достигает порядка величины. Это расхождение можно объяснить излучением мелкодисперсных частиц, состоящих из Al₂O₃, MgO, CaO, SiO₂ и SiC, для которых максимум функции Планка при соответствующих температурах кипения приходится на область 0,6—0,8 мк.

Разрушение сопровождается процессами сублимации исходного материала, а также вдувом газовой фазы из зоны деструкции через кокс в пограничный слой. Поэтому в пограничном слое возможна неоднородность, связанная с вдувом вместе с паром жидких и твердых частиц.

Обработка кинограмм показала, что в пограничном слое, в окрестности критической точки, где проводились спектральные измерения, частицы размером более 20 мк не наблюдаются. Обнаружено, что частицы более 20 мк вдуваются с поверхности модели в пограничный слой в областях сопряжения геометрических форм, где градиент скорости имеет большую величину.

Вопрос о наличии частиц менее 20 мк в пограничном слое, в области, где проводились спектральные измерения, остается открытым до проведения дополнительных исследований.

Если предположить, что в пограничном слое присутствуют частицы менее 20 мк, то они будут находиться в тонком слое, на внутренней границе, где температура газовой фазы соответствует 3500—4000° К. Эти частицы

относятся к классу высокотемпературных соединений, химический состав которых определяется продуктами пиролиза асбопластика.

При использовании стандартных моделей — пластина с цилиндрическим притуплением — оказалось, что вдоль линии наблюдения боковой разогретый слой вносит искажение в измеряемую спектральную интенсивность, причем его влияние в разных участках спектра различное. Измерения показывают, что вклад в излучение боковых высокотемпературных слоев значителен в ультрафиолетовой области 0.26—0.4 мк, где наблюдались ионы элементов и высоковозбужденные атомы. Измерения на моделях удлиненной формы (влияние бокового слоя сведено к минимуму) показали, что интенсивности отличаются в 1.5—2 раза в этой части спектра в пристеночной области.

Известно, что спектральные методы позволяют измерять интенсивность, усредненную вдоль луча наблюдения. Очевидно, что вклад боковых слоев в измеряемую интенсивность поперек пограничного слоя будет различен. Из сравнения двух сечений (фиг. 1 и 2) следует, что этот вклад максимален на внутренней границе (фиг. 1, кривая 1). Интересно, что мощные линии кислорода и азота из набегающего потока частично блокируются парами пограничного слоя в области 0.7—0.9 мк (фиг. 1).

Экспериментально подтверждается предположение, что вдвиг молекул, атомов и ионов с разрушающейся поверхности асбопластика в излучающий слой может изменить не только величину радиационного теплового потока, падающего на эту поверхность, но и спектр его излучения [1]. Полученные кривые спектрального распределения интенсивности излучения паров позволят рассчитать тепловые потоки к телу, оценить вклады различных спектральных областей в суммарный поток к телу и определить спектральный коэффициент поглощения.

Авторы признательны Ю. К. Рулеву за помощь в проведении эксперимента.

Поступила 8 II 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б. Тепловая защита. М., «Энергия», 1976.
2. Румынский А. Н. Теплообмен в лобовой точке, омываемой излучающей средой. Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, 1961, № 1.
3. Карасев А. Б., Кондранин Т. В. Разрушение графита в потоке низкотемпературной воздушной плазмы. Ж. прикл. спектроскопии, 1969, т. 11, № 3.
4. Георг Э. Б., Рулев Ю. К., Якушин М. И. Исследование теплового потока в передней критической точке тел, обтекаемых высокотемпературным дозвуковым потоком. Изв. АН СССР, МЖГ, 1973, № 5.
5. Георг Э. Б., Якушин М. И. Температурный пограничный слой на моделях, разрушаемых высокоэнтальпийным потоком газа. Изв. АН СССР, МЖГ, 1976, № 1.
6. Георг Э. Б., Якушин М. И. Структура концентрационного пограничного слоя на моделях, разрушаемых высокоэнтальпийным потоком воздуха. Инж.-физ. ж., 1977, т. 32, № 4.
7. Каменщиков В. А., Пластинин Ю. А., Николаев В. М., Новицкий Л. А. Радиационные свойства газов при высоких температурах. М., «Машиностроение», 1971.