

ных структур увеличивается, при этом интенсивность массового уноса уменьшается, т. е. увеличивается абляционная стойкость. На рис. 7 представлена картина интенсивности массового уноса ТЗП на основе бутилкаучука с различным содержанием сажи от времени эксперимента в высокотемпературных и высокоскоростных газовых потоках.

Из сказанного выше отметим, что изменение физико-механических свойств и абляционной стойкости аблирующих материалов на основе высокополимеров в значительной степени определяется процессами структурообразования в поверхностном слое.

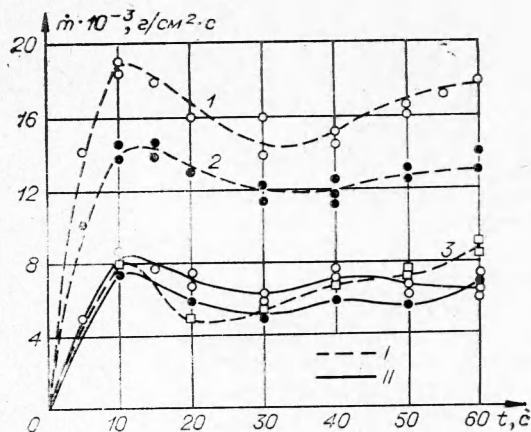


Рис. 7. Зависимость интенсивности массового уноса ТЗП на основе бутилкаучука ( $\dot{m}$ ) от времени эксперимента ( $t$ ) при атмосферном давлении.

1 —  $T_p = 2800^\circ \text{К}$ ; 2 —  $T_p = 2400^\circ \text{К}$ ; 3 —  $T_p = 1800^\circ \text{К}$ .  
I — состав с 20% сажистого наполнителя; II — состав с 35% сажистого наполнителя.

Поступила в редакцию  
3/V 1973

#### ЛИТЕРАТУРА

1. S. J. Tick, G. R. Huson, R. Griesel. S. Spacecraft, 1965, 2, 3.
2. A. F. Mills, A. V. Gomez. AIAA Paper, 1970, 869, 11.
3. В. А. Лошкарев, Г. В. Кузнецов, А. А. Дворяшин. Матер. III конф. по математике и механике, т. II. Томск, 1973.
4. В. Н. Вилюнов, А. А. Дворяшин. ФГВ, 1971, 7, 1.
5. В. А. Лошкарев, В. А. Шваб. Матер. III конф. по математике и механике, т. II. Томск, 1973.
6. V. N. Kondratiev. Zs Phys. 1930, 63, 322.
7. Л. И. Миркин. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. М., 1961.

УДК 536.468+532.6

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА РЕАГИРУЮЩИХ ТЕЛ С ПОТОКОМ НАГРЕТОГО ГАЗА

В. Е. Абалтусов, Г. Н. Исаков  
(Томск)

Коксующиеся и углеграфитные материалы нашли широкое применение для тепловой защиты аппаратов, контактирующих с высокотемпературной газовой средой. Физическая картина разрушения сложных композиционных материалов не позволяет однозначно выбрать теоретическую модель, которая в достаточной мере описывала бы все процессы, происходящие при нестационарном нагреве, воспламенении и уносе (горении) теплозащитного материала.

Проведенные теоретические исследования [1] показали, что на скорость уноса теплозащитного материала существенное влияние ока-

зывает как структура разрушаемой поверхности (механический унос), так и кинетика происходящих на ней химических реакций (химическое реагирование). Преобладание того или иного механизма для разных классов материалов и параметров набегающего газового потока различно и требует в каждом случае экспериментального исследования.

В данной работе на примере текстолита, относящегося к классу коксующихся теплозащитных материалов, проведено экспериментальное исследование нестационарного теплообмена, воспламенения и уноса (горения) в зависимости от параметров набегающего потока окислителя. Проведено также сравнение полученных опытных данных по воспламенению электродного графита ЭГ-0 в потоке кислорода с некоторыми теоретическими результатами [2].

Экспериментальная установка отличается от описанных в [3] тем, что ввод образца производится непосредственно в рабочую часть трубы так, что его лобовая критическая точка находится в строго фиксированном сечении кварцевого окна. Для предотвращения возможного воспламенения с боковой поверхности она термоизолируется слоем асбеста. Температура набегающего газового потока определяется термопарой ХА до и после каждого эксперимента с погрешностью  $\pm 10^\circ \text{C}$ , а скорость — по расходу газа. Быстродействующее электромагнитное устройство позволяет вводить образец в трубу за время, не превышающее 0,05 с. В качестве окислительных газов используется технически чистый кислород, который можно разбавлять азотом до любых концентраций, и предварительно осушенный и профильтрованный атмосферный воздух. Ввод кислорода и азота в нагревательную часть установки производится из баллонов высокого давления через редукторы и смешительное устройство, а атмосферный воздух нагнетается воздуходувкой. Расход газов определяется ротаметрами типа РС с погрешностью  $\sim 5\%$ .

Время воспламенения  $t_*$  текстолита измеряется двумя способами: фотоэлектрическим — с помощью фотоэлемента по появлению светящегося пламени, и термоэлектрическим — прокатанной микротермопарой ПП $\varnothing 20$  мк, наклеенной на лобовой образующей образца. Такой способ заделки микротермопары на поверхности сводит к минимуму погрешность измерения за счет теплоотвода в концы. Вследствие инерционности корректные измерения температуры поверхности  $T_w$  [4] можно производить спустя  $\sim 0,01$  с после начала нагрева с погрешностью 2—3%. Сигналы с микротермопар и фотоэлемента регистрируются вместе с

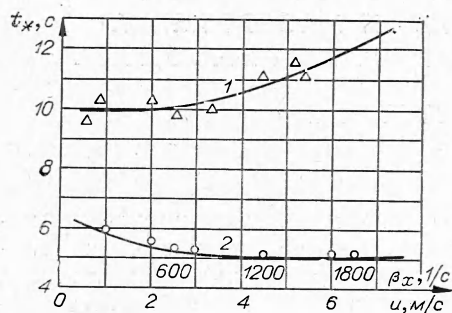


Рис. 1. Зависимость времени воспламенения от скорости потока (аэродинамического параметра  $\beta_x$ ) ( $T_e = 1070^\circ \text{K}$ ).  
1 —  $C_e = 0,21$ ; 2 —  $C_e = 0,98$ .

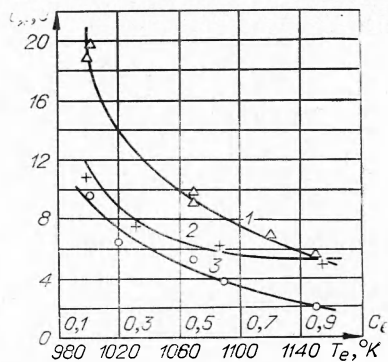


Рис. 2. Зависимость времени воспламенения от температуры потока (1 —  $u_e = 2,4$  м/с,  $C_e = 0,21$ ; 3 —  $u_e = 2,4$  м/с,  $C_e = 0,98$ ) и концентрации окислителя  $C_e$  (2 —  $T_e = 1070^\circ \text{K}$ ,  $u_e = 4,5$  м/с).

метками времени на светолучевом осциллографе Н-700. Погрешность определения времени воспламенения  $t$  составляет  $\sim 2\%$ .

Экспериментальная установка позволяет вести исследования в диапазоне температур до  $1200^\circ\text{K}$  и скоростей набегающего газового потока до  $10\text{ м/с}$ . Для изучения механизма воспламенения и определения скорости уноса материала использовалась скоростная киносъемка. Применение специальных микронасадок позволило производить съемку на кинопленку  $16\text{ мм}$  с 2-кратным увеличением.

Были исследованы закономерности воспламенения текстолита и электродного графита ЭГ-0 в потоке нагретого газа-окислителя. Эксперименты показали, что определение времени воспламенения по характеру поведения температуры поверхности (по перегибу) некорректно и требует привлечения контролирурующих способов. В наших опытах использовался оптический метод.

Были проведены эксперименты по изучению закономерностей воспламенения текстолита в зависимости от скорости набегающего потока  $u_e$  (или аэродинамического параметра  $\beta_x = \frac{3}{2} \cdot \frac{u_e}{R}$ ), температуры потока  $T_e$  и концентрации окислителя  $C_e$ .

Влияние  $u_e$  на время воспламенения  $t_*$  характеризуется либо увеличением  $t_*$  с ростом  $u_e$ , либо уменьшением  $t_*$  с ростом  $u_e$  (рис. 1)<sup>1</sup>. Такие закономерности объясняются сложностью механизма протекающих физико-химических превращений.

С ростом  $T_e$  (рис. 2) и концентрации окислителя в потоке  $C_e$  время воспламенения  $t_*$  уменьшается, что объясняется увеличением скорости химических реакций. Для выяснения механизма процесса воспламенения и разрушения текстолита была проведена киносъемка с 2-кратным увеличением. При обдувании потоком кислорода (рис. 3, а) воспламенение происходит в окрестности лобовой критической точки с интенсивным свечением продуктов физико-химических превращений и выбросом из микротрещин отдельных горящих частиц. С уменьшением концентрации окислителя в потоке (рис. 3, в) свечение менее интенсивно, однако в обоих случаях воспламенение происходит, вероятно, в трещинах обугленного слоя и носит гетерогенно-гомогенный характер. Детальные исследования микроструктуры погашенных после воспламенения

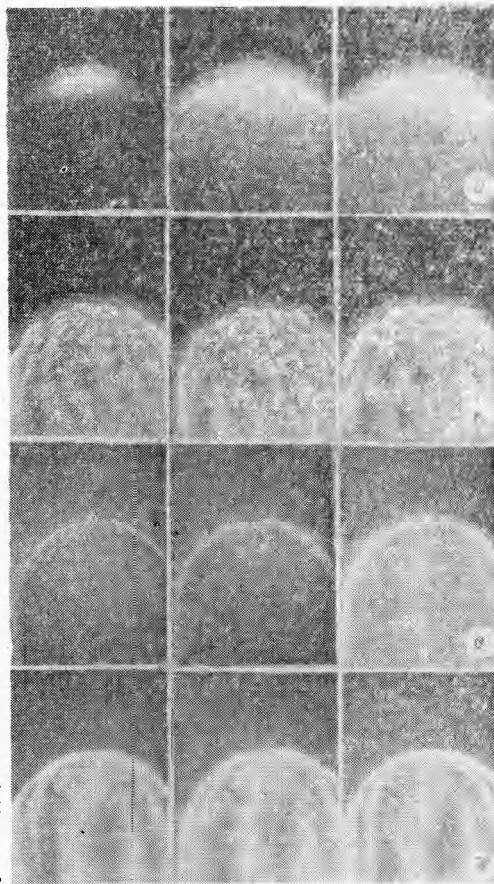


Рис. 3. Кинокадры процесса воспламенения образца из текстолита в потоке кислорода и воздуха (а, в) и его горения спустя  $10\text{ с}$  после воспламенения (б, в);  $T_e = 1020^\circ\text{K}$ ,  $u_e = 2\text{ м/с}$ .

<sup>1</sup> Здесь и далее каждой точке на экспериментальных кривых соответствует 3—4 измерения.

образцов показали, что с ростом  $T_e$  и  $C_e$  растет количество микротрещин на поверхности, а с увеличением времени прогрева до момента воспламенения значительно увеличивается их ширина и глубина. Динамика процесса дальнейшего разгара микротрещин и уноса коксового остатка в зависимости от концентрации окислителя в потоке хорошо прослеживается на рис. 3, б, г.

Реагирующее тело можно представить многослойной системой, состоящей из пористого участка, зоны реагирования, зоны разложения и выделения газообразных продуктов. На основе экспериментальных данных можно предположить, что одним из возможных механизмов воспламенения является образование зоны реагирования в порах и микротрещинах прококсованного слоя с дальнейшим выходом ее на поверхность образца.

Известно, что тепло, подводимое к поверхности пористого тела, под действием набегающего потока газа последовательно регенерируется в лежащих ниже слоях со скоростью, которая называется скоростью переноса тепла [5]. При этом фронт максимальной температуры свободной тепловой волны перемещается со скоростью

$$u = \frac{jC_2}{\rho_s c_s (1-f) + \rho_2 c_2 f}$$

Здесь  $j$ ,  $C_2$ ,  $\rho_2$ ,  $c_2$  — массовая скорость, концентрация, плотность и теплоемкость фильтруемого газа;  $\rho_s$ ,  $c_s$  — плотность и теплоемкость твердого тела;  $f$  — степень пористости. Если реагент входит в структуру пористого тела и последовательно выгорает, то место его воспламенения находится за фронтом максимальной температуры по ходу набегающего потока и скорость переноса реагирования приблизительно равна скорости переноса тепла [6]. При этом толщина диффузионного слоя, в котором распространяется тепловая волна:

$$l \sim \sqrt{D_{\text{эфф}} \cdot t_{\text{фхп}}}$$

где  $D_{\text{эфф}}$  — эффективный коэффициент диффузии через пористый материал,  $t_{\text{фхп}}$  — время физико-химических превращений.

Характерное механическое время распространения зоны реагирования в разлагающемся пористом теле равно:

$$t_{\text{мех}} \sim \frac{l}{u}$$

Скорость химического реагирования в пористом слое можно оценить по формуле [7]:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{C_e}{\frac{1}{\sqrt{k_s S_v D_{\text{эфф}}}} + \frac{\delta}{D_f}}$$

где

$$k_s = C_s^v \cdot k_0 \exp - \frac{E}{RT_s}; \quad \delta = \psi \left( \frac{\mu_e}{\rho_e} \cdot \frac{R}{u_e} \right)^{0,5} \sim \left( \frac{\mu_e}{\rho_e} \cdot \frac{1}{\rho_x} \right)^{0,5}; \quad D_{\text{эфф}} = D_f \cdot f^2;$$

$$D_f \sim T_e^{1,75}.$$

В этих выражениях  $S_v$  — поверхность микропор и микротрещин,  $\delta$  — толщина газовой пленки над поверхностью,  $\mu_e$  — динамическая вязкость набегающего потока.

Характерное время гетерогенно-гомогенного реагирования продуктов разложения с окислителем набегающего потока

$$t_{\text{хим}} \sim \left( \frac{dC}{dt} \right)^{-1}$$

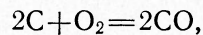


Тогда число Дамкеллера

$$\text{Dam} = \frac{t_{\text{мех}}}{t_{\text{хим}}} \sim \frac{f \sqrt{T_e^{1,75} \cdot t_{\text{фхп}} \cdot [\rho_s c_s (1-f) + \rho_2 c_2 f] \cdot C_e}}{f \sqrt{\frac{1}{C_s^y S_v T_e^{1,75} k_0 \exp - \frac{E}{RT_s}} + \frac{\sqrt{\frac{\mu_e}{\rho_e} \cdot \frac{1}{\beta_x}}}{T_e^{1,75}}}}$$

Проведенный качественный анализ экспериментальных данных показал, что существует критическое число  $\text{Dam}_*$ , с помощью которого можно разделить исследуемые режимы воспламенения. При  $\text{Dam} < \text{Dam}_*$  наблюдается режим воспламенения, когда зона гетерогенно-гомогенного реагирования организуется в пористом слое коксового остатка и очень быстро выходит на поверхность с появлением светящегося пламени вблизи нее. При таком режиме увеличение скорости набегающего потока  $u_e$  уменьшает время воспламенения  $t_*$  (рис. 1). Если же набор параметров потока таков, что  $\text{Dam} > \text{Dam}_*$ , то реализуется другой режим воспламенения, когда образовавшаяся внутри пористого слоя зона реагирования немедленно выходит на поверхность. При этом температурная кривая  $T_w(t)$  имеет две точки перегиба, из которых вторая отвечает моменту появления пламени. Увеличение же скорости  $u_e$  увеличивает время воспламенения  $t_*$  (рис. 1).

Если принять, что определяющей (лимитирующей) реакцией в порках коксового слоя является гетерогенная реакция [7]:



то численное значение критического числа Дамкеллера лежит в диапазоне  $0,05 < \text{Dam}_* < 0,3$  и для качественных оценок может быть принято равным  $\sim 0,1$ .

На рис. 4 представлена зависимость скорости уноса (горения) текстолита  $v_y(t)$  в потоке кислорода по результатам кинофотосъемки (время отсчитывается от момента воспламенения). Начиная с некоторого момента времени, она носит дискретный характер, что связано, вероятно, с механическим уносом разрушаемого коксового слоя.

Для проверки некоторых результатов теоретических исследований [2] были проведены эксперименты по воспламенению электродного графита ЭГ-0 в потоке кислорода. Время воспламенения определяется по перегибу температурной кривой  $T_w(t)$ , полученной записью на ос-

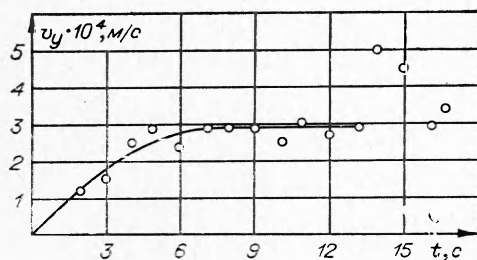


Рис. 4. Скорость уноса (горения) текстолита в потоке кислорода;  $T_e = 1020^\circ \text{K}$ ,  $u_e = 2 \text{ м/с}$ ,  $C = 0,98$ .

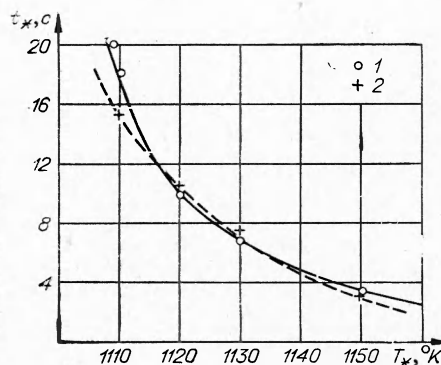


Рис. 5. Зависимость  $t_*(T_*)$ . 1 — эксперимент; 2 — теория.

