

В. Н. БУЛАНОВ, А. В. ВАСИЛЬЕВ, академик АН УССР И. Н. ФРАНЦЕВИЧ,  
В. Я. ШЕВЧЕНКО

### ФРАГМЕНТИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ АБЛЯЦИИ

Одной из характеристик, определяющих напряжение в теплозащитном материале (т.з.м.) в условиях абляционного разрушения их поверхностного слоя, является изменение их размера. В большинстве исследований, посвященных этому вопросу, используется при расчетах температурная зависимость коэффициента термического расширения (к.т.р.) (1). В работе (2) показано, что изменение размеров армированных пластика при нагревании зависит не только от к.т.р., но и от процессов роста и усадки, связанных с химическими превращениями. В работе (3) нами исследована температурная зависимость изменений размера углепластика. Установлено, что в интервале температур 150–350°С наблюдается увеличение размера углепластика с ростом температуры, что, как показано в (2), связано с релаксацией напряжений, аккумулированных в армирующем пакете в процессе прессования.

В работе (2) получены кинетические параметры процессов деформации углепластика, связанных с релаксацией упомянутых выше напряжений и структурированием образующегося при нагревании материала коксового остатка. Их значения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Кинетические характеристики процессов, протекающих при нагревании углепластика

| № ветви кинетического процесса | Температурный интервал, °К | Кинетические параметры |                 |                         |
|--------------------------------|----------------------------|------------------------|-----------------|-------------------------|
|                                |                            | $n$                    | $E$ , ккал/моль | $A$ , сек <sup>-1</sup> |
| 1                              | 343–593                    | 0,0                    | 11,6±0,2        | 170±20                  |
| 2                              | 593–943                    | 1,1±0,1                | 9,2±0,1         | 0,33±0,02               |
| 3                              | 943–1893                   | 1,2±0,1                | 17,4±0,1        | 2,0±0,2                 |

Рассчитанные погрешности в определении параметров, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о том, что наблюдаемые процессы удовлетворительно описываются степенной зависимостью скорости реакции от концентрации. Поэтому кинетическое уравнение процессов, происходящих в углепластике при нагревании, может быть представлено в виде

$$\frac{dC}{d\tau} = -A \exp \left[ \frac{-E}{RT(x, \tau)} \right] c^n, \quad (1)$$

где в качестве концентрации используется величина  $C = (l - l_k) / (l_0 - l_k)$ ;  $l$ ,  $l_0$ ,  $l_k$  — соответственно текущий, начальный и конечный размеры образца, мм;  $\tau$  — время, сек.;  $A$  — предэкспоненциальный множитель — величина, постоянная для данного эксперимента, сек<sup>-1</sup>;  $E$  — кажущаяся энергия активации рассматриваемого процесса, кал/моль;  $R$  — газовая постоянная, кал·град<sup>-1</sup>·моль<sup>-1</sup>;  $n$  — порядок реакции;  $x$  — расстояние до аблирующей поверхности, мм.

В аблирующем материале существует переменное по толщине и во времени распределение температур, характер которого следует учитывать при интегрировании уравнения (1). Это распределение является сложной функцией теплового потока к поверхности материала, условий теплообмена в пограничном слое и теплофизических свойств материала в функции от температуры.

Для того чтобы выявить основные закономерности, связанные с кинетикой изучаемых процессов, достаточно рассмотреть упрощенную схему процесса абляции т.з.м., приблизительно адекватную истинной. При этом без большой ошибки могут быть приняты допущения, что на поверхности тела мгновенно устанавливается некоторая температура  $T_w$ , а сама

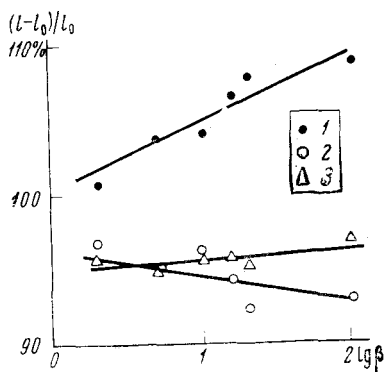


Рис. 1

Рис. 1. Зависимость величины  $(l-l_0)/l_0$  от скорости нагрева

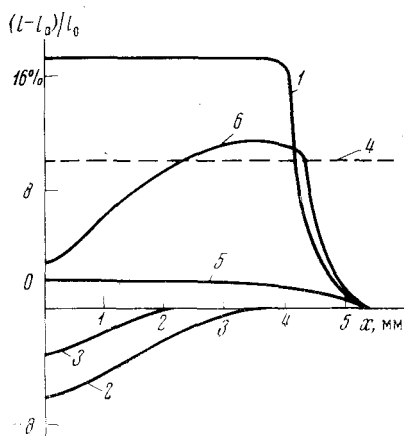


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость линейных размеров углеродистика от расстояния до аблирующей поверхности;  $\tau=31$  сек.,  $v=0,05$  мм/сек

поверхность из-за абляции перемещается от начального положения со скоростью  $v=\text{const}$  в глубь материала. В этом случае распределение температур определено из решения краевой задачи теплопроводности для полуограниченного тела. В системе координат, перемещающейся вместе с аблирующей поверхностью со скоростью  $v$ , можно записать:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \tau} &= v \frac{\partial T}{\partial x} + a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \\ T(x, 0) &= T, \\ T(0, \tau) &= T_w, \\ \frac{\partial T(\infty, \tau)}{\partial x} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $a$  — температуропроводность.

В предположении  $a=\text{const}$  решение задачи (2) имеет вид

$$T(x, \tau) = T_0 + \frac{1}{2}(T_w - T_0) \left\{ \exp[-v(x-v\tau)/a] \operatorname{erfc} \left[ \frac{(x-2v\tau)}{2\sqrt{a\tau}} \right] + \operatorname{erfc} \left[ \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \right] \right\}. \quad (3)$$

Результаты вычислений (при  $a=0,79 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/час и  $T_w=2600^\circ$  К) по выражению (3) и кинетические параметры (табл. 1) подставляли в уравнение (1), что позволило рассчитать зависимости  $C$  от  $x$  и  $\tau$  при различных постоянных значениях  $v$ . Все расчеты выполнены на ЭВМ «Минск-32» по специально разработанной программе.

Для практической оценки напряжений, возникающих в углепластике в процессе нагрева, необходимо определение величины  $l(x, \tau, v)$ , которую можно найти из значений  $C(x, \tau, v)$  лишь после  $l_0$ , зависящей от скорости нагрева  $\beta$ . Обработка экспериментальных результатов <sup>(2)</sup> позволила построить зависимости величины  $(l-l_0)/l_0$  от скорости нагрева для всех ветвей кинетических процессов (рис. 1). Данные рис. 1 были использованы для перехода от величины  $C(x, \tau, v)$  к величинам  $[(l-l_0)/l_0](x, \tau, v)$ . В качестве примера на рис. 2 приведены зависимости  $(l-l_0)/l_0$  от  $x$  при  $v=0,05$  мм/сек. и  $\tau=31$  сек. Кривые 1, 2 и 3 представляют собой зависимости  $(l-l_0)/l_0$  от расстояния до аблирующей поверхности для 1, 2 и 3 кинетических ветвей соответственно.

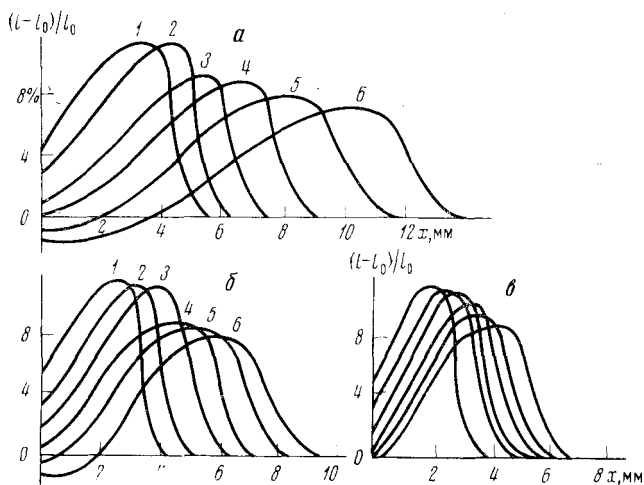


Рис. 3. Зависимость изменения линейных размеров от расстояния до аблирующей поверхности при различной скорости абляции  $v$ , мм/сек: а — 0; б — 0,05; в — 0,10. Кривые 1, 2, 3, 4, 5, 6 для  $\tau=16, 31, 46, 61, 91, 121$  сек. соответственно

Как упоминалось выше, причиной увеличения размера материала (рис. 2, 1) является релаксация напряжений, аккумулированных в армирующем пакете ткани при прессовании. По данным наших измерений для пакета угольной ткани максимальная деформация при давлениях, использованных при прессовании ( $25 \text{ кг/см}^2$ ), составила 10–15%. Очевидно, увеличение размера материала за счет релаксации напряжений не может превышать этой величины. Кроме того, учитывая сопротивление, которое матрица оказывает перемещению элементарных волокон, положительные изменения величины  $(l-l_0)/l_0$  ограничены 10% (рис. 2, 4).

Кривая 5 отражает изменение линейных размеров материала за счет к.т.р. Алгебраическая сумма ординат кривых 2, 3, 5, а также 1 с учетом 4 дает кривую 6, представляющую собой зависимость изменений линейных размеров углепластика от расстояния до аблирующей поверхности.

На рис. 3 приведены окончательные результаты расчетов для скоростей абляции  $v=0; 0,05$  и  $0,1$  мм/сек. Сопоставление этих данных показывает, что с увеличением скоростей абляции существенно сокращается область, затронутая физико-химическими превращениями. Учитывая уже обсуждавшиеся выше свойства матрицы, соответствующие низкотемпературным участкам кривых (высокая пластичность), можно полагать, что при фрагментировании поверхности трещины, зарождающиеся на ней, будут ограничены по глубине координатами, отвечающими максимальным значениям изменений линейных размеров.

Данные рис. 3 были сопоставлены с результатами измерения глубины распространения трещины в углепластике после воздействия высокотемпе-

ратурного газового потока в течение 120 сек. В процессе испытаний скорость абляции составила примерно 0,05 мм/сек (на рис. 4 представлена микроструктура материала). Средняя по 50 измерениям глубина распространения трещины составила  $6,0 \pm 0,8$  мм, что удовлетворительно согласуется со значением  $5,8 \pm 1,1$  (кривая 6, на рис. 3в). Таким образом, выполненное исследование позволило выявить главную причину фрагментирования поверхностного слоя углепластика в процессе абляционного

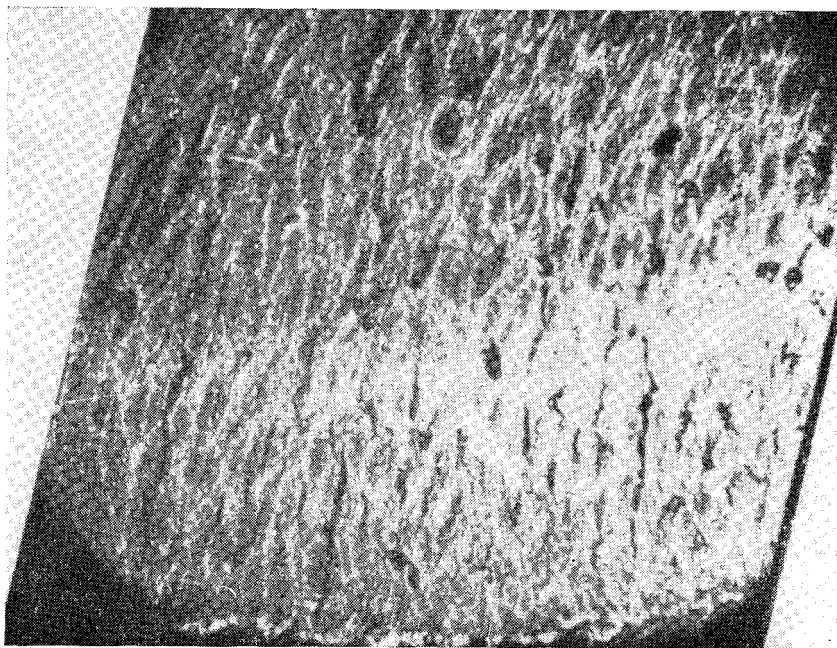


Рис. 4. Микроструктура углепласта после воздействия высокотемпературного газового потока, 15×

разрушения и дает возможность количественной оценки ожидаемой глубины трещин, зарождающихся на поверхности.

Из проведенного анализа вытекает также весьма важное следствие: при абляционном разрушении теплозащитных материалов рост вклада теплового разрушения одновременно снижает долю разрушения за счет механического уноса, что хорошо коррелирует с известным фактом повышения эффективности теплозащитных материалов при возрастании тепловых потоков к их поверхности.

Институт проблем материаловедения  
Академии наук УССР  
Киев

Поступило  
27 V 1974

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> Ю. А. Душин, Работа теплозащитных материалов в горячих газовых потоках, Л., 1968. <sup>2</sup> В. Я. Шевченко, В. М. Буланов, О. В. Васильев, Докл. АН УССР, сер. А, № 10 (1974).