

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ КОКСЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Г. Я. Мамонтов

Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634000 Томск, paa@ctc.stu.ru

Экспериментально исследованы поля температур в прококсованных слоях полимерных композитных материалов (стеклопластиков) при высокотемпературном нагреве и последующем охлаждении в потоке холодного окислителя. На основании анализа экспериментальных данных и численных исследований установлено, что в прококсованном слое стеклопластиков возможно протекание экзотермических химических реакций, в результате чего создаются условия для сохранения в течение достаточно длительного времени высоких температур в слое кокса композита.

Ключевые слова: эксперимент, полимерный композитный материал, кокс, высокие температуры, экзотермические физико-химические превращения.

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные композитные материалы уже давно используются в различных технических устройствах [1, 2]. При этом полимерные композиты типа стеклопластиков применяются, в частности, для изготовления изделий, работающих в условиях возможного возникновения пожаров [3]. Однако теория горения полимерных материалов, опирающаяся на достаточно обширную экспериментальную базу, разработанную в основном для однородных (гомогенных) пластмасс [3, 4] и не учитывает особенностей процессов тепло- и массопереноса в высокотемпературном коксе, обусловленных структурой и свойствами полимерных композитов. В свою очередь, теория гетерогенного воспламенения полимерных композитов [4] не учитывает специфики термохимических процессов в прококсованном слое таких материалов при температурах выше 700 К. Известных экспериментальных данных [5, 6] о закономерностях высокотемпературного разрушения стеклопластиков различной структуры в практически инертной среде недостаточно для достоверного описания процессов воспламенения и горения полимерных композитов в условиях пожаров. Большое как по объему, так и по массе содержание инертного наполнителя (стекловолокна) может способствовать флегматизации процессов воспламенения и горения стеклопластиков по сравнению с однородными полимерами (например, термопластами). Эксперименты [4, 7, 8] показывают, что возможны ре-

жимы не только воспламенения, но и достаточно устойчивого горения прококсованных стеклопластиков в потоке окислителя, например, воздуха. В то же время пока нет оснований говорить о том, что достоверно установлены основные закономерности воспламенения и горения полимерных композитов и сформулированы физические модели процессов, протекающих на поверхности и в тонком прококсованном прилегающем к поверхности нагрева слое стеклопластика при воспламенении и горении. Цель данной работы — экспериментальное исследование основных закономерностей процессов, предшествующих воспламенению типичных стеклопластиков.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проведения экспериментов с образцами стеклопластика в форме пластин использовалась экспериментальная установка (рис. 1), основными элементами которой являлись газогенератор и вращающаяся платформа с тремя образцами. Поток окислителя заданной температуры, значение которой контролировалось термодарой и поддерживалось специальным нагревателем, подавался по трубопроводу из нержавеющей стали диаметром $6,3 \cdot 10^{-2}$ м. В среднем сечении трубы устанавливалась сетка для стабилизации потока окислителя. Вращающееся устройство, на котором закреплялись три металлических держателя с образцами и один с датчиком теплового потока, использовалось для ввода образцов, нагреваемых

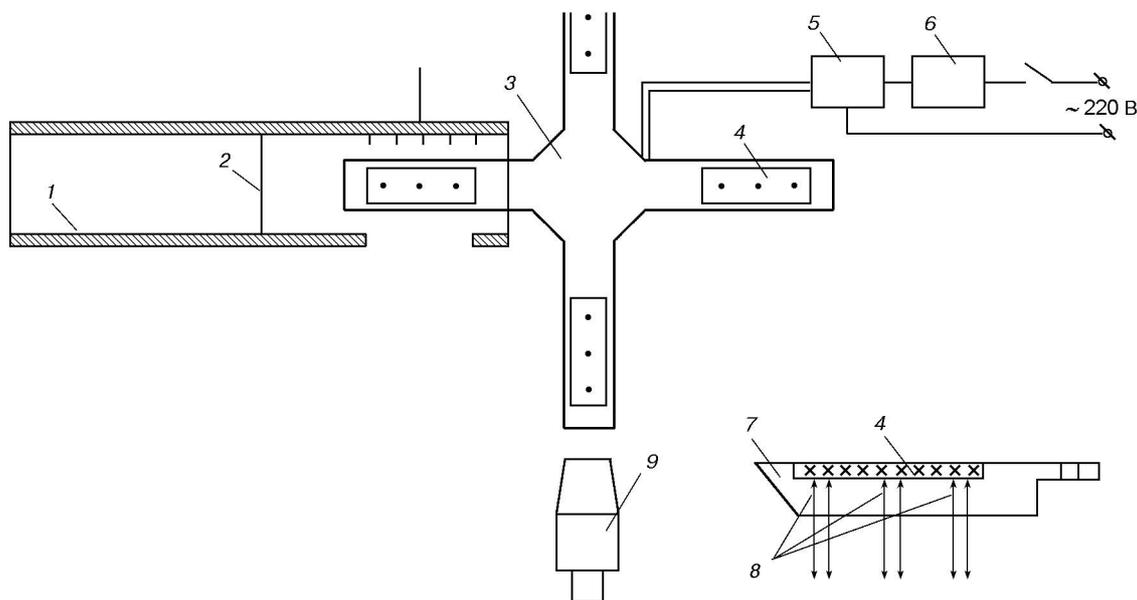


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 — трубопровод, 2 — сетка для выравнивания потока, 3 — вращающееся устройство с образцами, 4 — образцы, 5 — электромагнит, 6 — электросекундомер, 7 — держатели, 8 — прижимные устройства для термопар, 9 — газогенератор

газогенератором, в полость трубы через боковую прорезь. Образцы выводились из трубы после завершения эксперимента. Вращающееся устройство приводилось в движение электромагнитом, который включался по сигналу электросекундомера, регламентирующего продолжительность эксперимента. Форма державок из нержавеющей стали позволяла проводить эксперименты с образцами стеклопластика в виде пластин размером $100 \times 20 \times 10$ мм. Такая форма образцов, выбранная по аналогии с [9], позволяла исключить ряд ограничений, накладываемых на результаты экспериментов с образцами другой формы (например, цилиндра со сферическим затуплением [10] или полусферы). Передняя кромка образцов закрывалась от воздействия высокотемпературной среды клиновидным обтекателем. Задняя и боковые поверхности образца теплоизолировались.

В трех сечениях по толщине образца устанавливались хромель-алюмелевые термопары, сваренные встык и прокатанные до толщины 50 мкм. Для того чтобы термопара, закрепляемая на поверхности образца, во время эксперимента не отрывалась от стеклопластика, ее концы в течение опыта подтягивались специальным прижимным устройством.

При проведении одного эксперимента в

трех металлических держателях устанавливались образцы стеклопластика, а в четвертом держателе закреплялся датчик теплового потока [11]. Датчик располагался на расстоянии, соответствующем сечению установки термопар в образце. Принятая схема размещения образцов и датчиков теплового потока позволяла при установившемся режиме работы газогенератора проводить эксперименты с относительно низкими погрешностями.

Пробные эксперименты показали, что при измерении температуры в образцах систематические погрешности (величина которых не превышала 1,5 %) обусловлены не только погрешностями непосредственно термопарных измерений. Зафиксирован также разброс результатов, носящий случайный характер и обусловленный некоторыми достаточно малыми неконтролируемыми отклонениями от нормативных значений глубины заделки термопар. Конфигурации спаев термопары и углубления для его размещения в стеклопластике не всегда совпадают из-за неоднородной структуры этого композита (слои стекловолокна и связующего чередуются). Контроль глубины заделки проводился с погрешностью $\pm 4 \div 5$ %. По этим причинам, возможно, и возникали некоторые отклонения в результатах измерения температуры, приво-

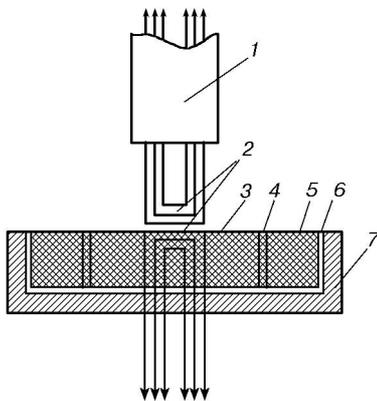


Рис. 2. Принципиальная схема зонда для измерения температуры в газовой фазе и в образцах стеклопластика:

1 — зонд, 2 — термопары, 3 — измерительная пробка, 4 — слой клея на основе эпоксидной смолы, 5 — образец в форме пластины, 6 — прокладка из асбестоцемента, 7 — металлический держатель

дившие к случайным ошибкам.

Для того чтобы увеличить достоверность измерений, опыты проводили три раза подряд в идентичных условиях. Датчик теплового потока использовался для контроля за идентичностью условий теплового воздействия на образцы. Давление в магистрали газогенератора контролировалось манометром. Погрешность измерения температуры, оцениваемая по методике [12], не превышала $6 \div 8 \%$. Среднеинтегральная по времени скорость подъема температуры в процессе нагрева образца составляла $50 \div 150$ К/с. Время ввода образца после нагрева в поток холодного окислителя составляло не более 0,02 с. Погрешность измерения времени при определении момента воспламенения стеклопластика также не превышала 0,02 с. Скорость и температура окислителя в потоке измерялись блоком ротаметров по методике [13] и зондами, схема которых представлена на рис. 2. Зонды устанавливались в тех же сечениях образца, что и термопары. Расстояние между тремя термопарами, спай которых находились на одной вертикальной оси, варьировались в пределах $(0,5 \div 1) \cdot 10^{-3}$ м. С целью уменьшения погрешностей измерения температуры за счет теплоотвода плечи П-образных термопар располагались вдоль изотермических поверхностей пластин, перпендикулярно набегающему потоку окислителя. Постоянная времени [14] используемых термопар составляла $0,05 \div 0,4$ с. Все измерения проведены с учетом

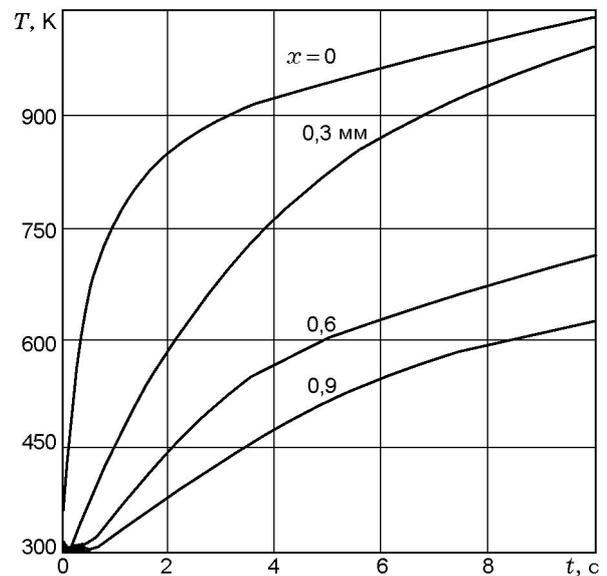


Рис. 3. Профили температуры в образце стеклопластика на различных расстояниях от нагреваемой поверхности

этой постоянной. Нагрев каждого образца продолжался 8 с.

В опытах реализовывался режим продольного обтекания образцов. Скорость высокотемпературного газового потока составляла $21 \div 48$ м/с, скорость потока холодного окислителя $5 \div 6$ м/с. Вслед за образцами в высокотемпературный поток вводился держатель с датчиком теплового потока, и одновременно измерялась температура газа с использованием угольного стержня, яркостная температура которого измерялась эталонным оптическим пирометром ЭОП-66 [11].

Эксперименты проводили со стеклопластиком, идентичным по составу и свойствам описанному в [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 3 приведены результаты измерения температуры в образце на разных глубинах в типичном эксперименте (время прогрева образца 8 с), а на рис. 4 — профили температуры образца в различные моменты времени. Хорошо видно, что с течением времени профили температуры заметно деформируются. При этом кривые $T(x)$ отличаются от кривых, соответствующих как инертному прогреву композиционных материалов [15], так и прогреву при пиролизе [12]. Существенные изменения темпе-

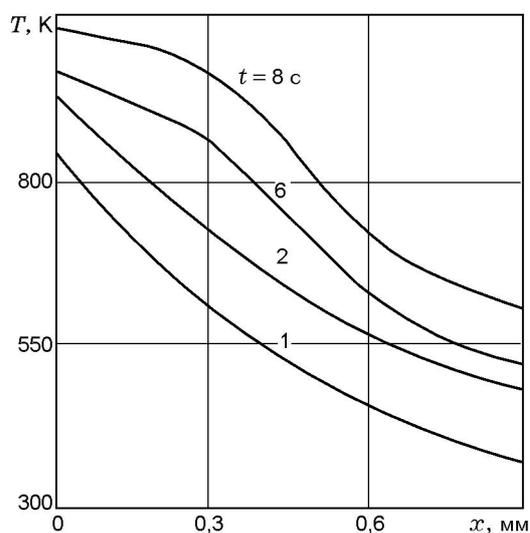


Рис. 4. Профили температуры в образце стеклопластика в различные моменты времени

ратуры происходят и в период времени, когда образец стеклопластика находится в потоке холодного окислителя (при $t > 8$ с) до момента воспламенения.

Необходимо отметить, что все исследования проводились в диапазоне времени, соответствующем периоду прогрева прококсованных образцов в потоке холодного окислителя без воспламенения. Продолжительность опыта выбиралась такой, чтобы избежать воспламенения и горения образцов. Тепловой эффект горения стеклопластика значительно превосходит тепловые эффекты всех других физических и химических процессов в прогревом слое материала, и выделить по данным термопар обнаруженные особенности процесса коксования композита становится невозможно.

На основании анализа данных проведенных экспериментов с учетом установленных ранее [8] закономерностей процессов тепло- и массопереноса в стеклопластиках при высоких температурах выделены три основных процесса.

1. Охлаждение композита при взаимодействии с потоком холодного окислителя.
2. Тепловыделение в результате протекающих внутрипоровых реакций окисления кокса полимерного связующего кислородом, диффундирующим по порам при термическом разложении полимерного связующего.
3. Тепловыделение при термическом разложении полимерного связующего и сопутству-

ющих этому процессу реакций.

С целью анализа полей температур в прогревом слое прококсованного стеклопластика в период взаимодействия с холодным окислителем проведено численное моделирование процессов тепло- и массопереноса в этом слое с использованием математической модели, существенно отличающейся от моделей [12, 15, 16].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассматривалась задача о поле температуры в пластине стеклопластика, нагреваемой с одной стороны в течение определенного времени высокотемпературным газовым потоком в условиях, идентичных проведенным экспериментам, с последующим охлаждением потоком холодного окислителя в течение периода времени, соответствующего по терминологии [17] «времени задержки воспламенения» (процессы непосредственно воспламенения и горения композита не рассматривались). Задача решена в рамках традиционной постановки [12, 15, 16], учитывающей конвективный и радиационный теплообмен с внешней высокотемпературной средой, прогрев и термическое разложение стеклопластика, вдув продуктов разложения в пристенную область и охлаждение кокса газообразными продуктами реакции термического разложения, фильтрующимися к нагреваемой поверхности пластика.

При постановке задачи не учитывалась возможность реализации в прогревом слое стеклопластика процессов высокотемпературного разрушения, подобных описанным в [5, 6, 12, 15] (растрескивание, диспергирование, сдвиговые деформации, плавление и стекание пленки расплава). Осмотр образцов исследуемых материалов после экспериментов показал отсутствие признаков каких-либо термомеханических процессов на поверхности или в тонком приповерхностном слое стеклопластиков.

Задача решалась для двух интервалов времени, соответствующих протекающим последовательно процессам высокотемпературного нагрева композита ($0 < t \leq t_h$) и охлаждения в потоке холодного окислителя ($t_h \leq t \leq t_c$). В первом интервале изменения времени температура среды принималась равной 2200 К, во втором — 300 К. Математическая модель, описывающая рассматриваемые процессы в рамках принятой физической модели, сводится к

следующей системе уравнений с соответствующими краевыми и начальными условиями, а также рядом дополнительных соотношений:

$$(\rho c)_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \rho_1 V_1 c_1 \frac{\partial T}{\partial x} - Q_d W_d, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_1 \varphi_1) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_1 \varphi_1 v_1) = W_d \Gamma, \quad (2)$$

$$\rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = -W_d, \quad (3)$$

$$\rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = W_d (1 - \Gamma), \quad (4)$$

$$W_d = B_d \rho_4 \varphi_4 \exp \left(- \frac{E_d}{RT} \right), \quad (5)$$

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 = 1, \quad (6)$$

$$p = \frac{\rho_1 RT}{M_1}, \quad (7)$$

$$V_1 = - \frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \dot{m}_1}{\partial x} = W_d, \quad (9)$$

$$(\rho c)_{\Sigma} = \rho_1 \varphi_1 c_1 + \rho_2 \varphi_2 c_2 + \rho_3 \varphi_3 c_3 + \rho_4 \varphi_4 c_4, \quad (10)$$

$$\lambda_{\Sigma} = \varphi_1 \lambda_1 + \varphi_2 \lambda_2 + \varphi_3 \lambda_3 + \varphi_4 \lambda_4, \quad (11)$$

$$0 \leq x \leq d, \quad 0 \leq t \leq t_c, \quad (12)$$

$$t = 0: \quad T = T_0, \quad \varphi_4 = \varphi_{40}, \quad \varphi_1 = \varphi_0, \quad \varphi_3 = \varphi_{30}, \quad (13)$$

$$x = 0: \quad \lambda_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad \dot{m}_1 = 0, \quad (14)$$

$$x = d: \quad (\alpha - \eta \dot{m}_1 c_1) (T_e - T_s) + \sigma \varepsilon (T_e^4 - T_s^4) = -\lambda_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial x} + W_c Q, \quad (15)$$

$$W_c = B_c \rho_2 \varphi_2 C \exp \left(- \frac{E}{RT_s} \right), \quad (16)$$

Здесь T — температура; t — время; c — удельная теплоемкость; ρ — плотность; λ — коэффициент теплопроводности; V — скорость движения газов; W , Q — скорость и тепловой эффект химической реакции; Γ — коэффициент газификации; x — пространственная координата; φ — объемная доля; E , B — энергия активации и предэкспоненциальный множитель; R — универсальная газовая постоянная; μ — динамическая вязкость; p — давление; K — проницаемость пор; \dot{m}_1 — массовый расход газообразных продуктов физико-химических превращений; d — толщина слоя стеклопластика; α — коэффициент теплоотдачи; η — коэффициент вдува; σ — постоянная Стефана — Больцмана; ε — приведенная степень черноты; M — молекулярная масса; C — концентрация активных компонентов (водяной пар и двуокись углерода) во внешнем потоке. Индексы: 0 — начальное значение; 1 — газообразные продукты термического разложения; 2 — конденсированные продукты термического разложения; 3 — наполнитель (стекловолокно); 4 — исходное полимерное связующее; e — внешний газовый поток; s — нагреваемая поверхность; h — нагрев; d — реакция разложения; c — реакция окисления углерода кокса активными компонентами газового потока; Σ — суммарное значение.

Численный анализ исследуемых процессов проведен при следующих значениях теплофизических и термохимических параметров материала и характеристик внешней среды (соответствующих проведенным экспериментам): $\rho_4 = 1450$ кг/м³; $c_4 = 1100$ Дж/(кг · К); $\lambda_4 = 0,4$ Вт/(м · К); $\rho_2 = 1400$ кг/м³; $c_2 = 1150$ Дж/(кг · К); $\lambda_2 = 0,65$ Вт/(м · К); $\rho_3 = 2050$ кг/м³; $c_3 = 1250$ Дж/(кг · К); $\lambda_3 = 0,45$ Вт/(м · К); $c_1 = 1200$ Дж/(кг · К); $\lambda_1 = 0,12$ Вт/(м · К); $\Gamma = 0,5$; $Q_d = 1,05 \cdot 10^6$ Дж/кг; $B_d = 10^5$ с⁻¹; $E_d = 84 \cdot 10^3$ Дж/моль; $M_1 = 25 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; $\mu = 5 \cdot 10^{-5}$ Па·с; $K = 10^{-12}$ м²; $C = 0,12$.

Задача решена методом конечных разностей [18]. Система разностных нелинейных уравнений решена методом итераций. На каждой итерации система алгебраических уравнений решалась методом прогонки с применением неявной разностной четырехточечной схемы [18]. Типичные результаты расчетов в виде распределений температуры по толщине слоя

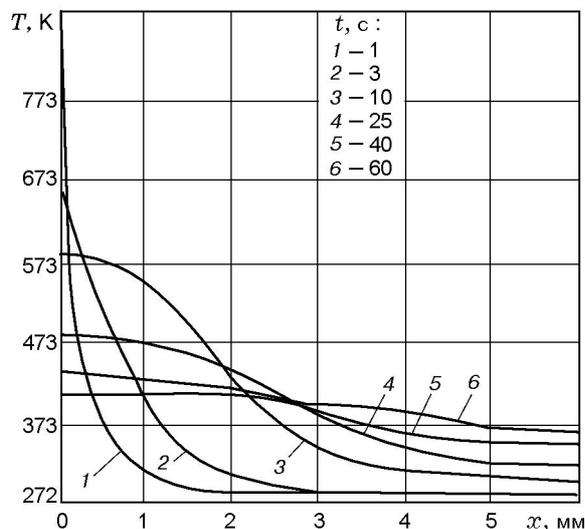


Рис. 5. Распределение температуры по толщине образца в различные моменты времени, отсчитываемые от начала его охлаждения

стеклопластика приведены на рис. 5. Хорошо видно, что после завершения периода прогрева и коксования композита при установлении $T_e = 300$ К температура в приповерхностных слоях стеклопластика начинает интенсивно падать и уже через 5 с температура поверхности отличается от максимальной почти на 500 К. Таким образом, расчетные профили $T(x)$ существенно отличаются от экспериментальных.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ сформулированной выше гипотезы показал, что охлаждение тонкого, прогретого до высоких температур слоя прококсованного стеклопластика вблизи нагреваемой поверхности образца приводило бы, в первую очередь, к резкому падению температур в тонком приповерхностном слое. В экспериментах этого не зафиксировано (см. рис. 3, 4). Следовательно, отклонение профилей температуры от параболического обусловлено другой причиной.

Диффузия молекул кислорода в коксе стеклопластика также невозможна, потому что при сохранении в коксе достаточно высоких температур в анализируемом интервале времени продолжается пиролиз связующего в композите с выделением газообразных продуктов, которые просачиваются к поверхности и препятствуют диффузии кислорода в поры стеклопластика.

Следовательно, можно сделать вывод, что изменение профиля температуры в период охлаждения прококсованного стеклопластика связано с экзотермическими физико-химическими превращениями в коксе. Известно [12, 15], что для большинства полимерных материалов процесс образования кокса является эндотермическим, а высокополимеры находятся в термодинамически неустойчивом, но метастабильном состоянии в некотором диапазоне температур [19]. В этом случае [19] метастабильная система при пиролизе первоначально переходит в некоторое промежуточное состояние. На этот переход затрачивается определенная энергия, и из промежуточной структуры осуществляется переход к более устойчивому состоянию. В случае коксующихся полимеров такой переход соответствует протеканию поликонденсационных реакций синтеза кокса, сопровождающихся выделением тепла [19]. Одновременно с экзотермическими реакциями синтеза в процессе коксования полимера протекают также и экзотермические окислительные реакции, обусловленные наличием атомов кислорода в молекуле полимера. Однако известно [20], что влияние окислительных реакций на тепловыделение при коксовании существенно зависит от температуры и проявляется в основном на начальных этапах деградации. Необходимо также отметить низкий уровень содержания кислорода в молекулах типичных полимерных связующих (эпоксидные, эпоксифенольные, полиаминомидные) [15], используемых при изготовлении конструктивных полимерных композитов типа стеклопластика.

На рис. 6 приведена экспериментальная зависимость $T(x)$ для пластины из стеклопластика на глубине $x = 0,3$ мм в период высокотемпературного нагрева, а также результаты расчетов с использованием модели (1)–(16). Рассматривалось три варианта: расчет с учетом реакции синтеза в коксе (кривая 2); коэффициент температуропроводности a зависит от температуры (кривая 3); значение a соответствует температуре 300 К (кривая 4).

В расчетах использовались граничные условия первого рода с определяемой в эксперименте зависимостью температуры поверхности от времени. Кинетические характеристики учитываемой экзотермической реакции синтеза определены в [21]. Сопоставление полученных экспериментальных данных с теоретическими

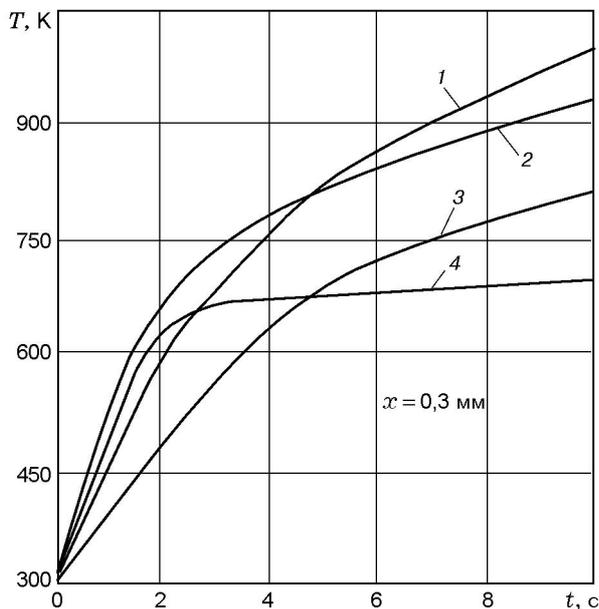


Рис. 6. Экспериментальные и расчетные зависимости температуры в фиксированных по толщине образца точках от времени:

1 — эксперимент; 2–4 — расчет: 2 — с учетом экзотермической реакции в коксе, 3 — $a = a(T)$, 4 — $a = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$

кими позволяет сделать следующие выводы по модели термохимических процессов в прогретом слое стеклопластика в потоке холодного окислителя после предварительного интенсивного коксования композита.

В условиях интенсивного прогрева пластика наиболее вероятной причиной деформации профиля температуры является тепловыделение в результате протекания в коксе экзотермической реакции синтеза [19]. Этот вывод также подтверждается результатами дифференциально-термического и термогравиметрического анализов, проведенных в инертной среде с исследовавшимся типичным стеклопластиком.

Рассматриваемый процесс носит затухающий характер, но он приводит к дополнительному прогреву стеклопластика и, соответственно, дополнительному коксованию по сравнению с вариантом, когда протекают только эндотермические реакции пиролиза.

Результаты проведенных экспериментов показывают, что в прококсованном слое стеклопластика, образующемся после взаимодействия композита с высокотемпературной внешней средой, возможны экзотермические хими-

ческие реакции. Эти реакции способствуют сохранению в течение достаточно большого времени (10 с) высоких температур в прококсованном слое, что создает реальные предпосылки для воспламенения прококсованного стеклопластика потоком даже холодного окислителя. Обнаруженный эффект, возможно, является необходимым условием воспламенения композитных полимерных материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены экспериментальные исследования закономерностей термохимических процессов в слое прококсованного стеклопластика в период интенсивного высокотемпературного нагрева и в период охлаждения в потоке окислителя, предшествующий воспламенению композита. Полученные данные характеризуют не только свойства типичного полимерного композиционного материала, определяющие тепловые условия возможного воспламенения и последующего горения стеклопластика в среде окислителя, но и служат дополнительной информацией для развития известных моделей воспламенения и горения полимеров [3, 4], а также, возможно, для апробации этих моделей и построения новых.

Полученные в экспериментах закономерности также показывают, что особенности структуры полимерных композитов, вытекающие, в первую очередь, из требований к их механическим свойствам, оказывают влияние на характер и интенсивность термохимических процессов в прококсованных слоях этих материалов при высоких температурах. Достаточно интенсивное, как показали эксперименты, тепловыделение в коксе стеклопластиков создает более благоприятные условия для воспламенения таких материалов по сравнению, например, с гомогенными полимерами [3, 4]. Размеры прогретой зоны гомогенных полимеров существенно меньше толщины прококсованного слоя композитов, экзотермические твердофазные реакции отсутствуют, а температура поверхности существенно меньше в идентичных диапазонах параметров теплового и химического воздействия внешней среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маллинсон Дж. Применение изделий из стеклопластиков в химических производствах: Пер. с англ. / Под ред. В. И. Альперина, С. М. Перлина. М.: Химия, 1973.

2. Назаров Г. И., Сушкин В. В. Теплостойкие пластмассы: Справочник. М.: Машиностроение, 1980.
3. Асеева Р. М., Заиков Г. Е. Горение полимерных материалов. М.: Наука, 1981.
4. Исаков Г. Н. Моделирование нестационарных процессов тепломассопереноса и воспламенения в реакционноспособных средах. Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 1988.
5. Кузнецов Г. В. Механизм высокотемпературного разрушения стеклопластика в газовых потоках в условиях высоких давлений // Теплофизика высоких температур. 1998. Т. 36, № 1. С. 74–78.
6. Кузнецов Г. В. Высокотемпературное разрушение композитных материалов при интенсивном тепловом и газодинамическом воздействии // Механика композитных материалов. 1998. Т. 34, № 1. С. 107–115.
7. Кодолов В. И. Горючесть и огнестойкость полимерных материалов. М.: Химия, 1976.
8. Исаков Г. Н., Мамонтов Г. Я. Нестационарный теплообмен и воспламенение стеклопластиков при переменных тепловых нагрузках // Сб. материалов региональной науч.-практ. конф. Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 1977. С. 203–205.
9. Кузнецов Г. В. Высокотемпературное разрушение резиноподобных теплозащитных материалов в условиях высоких давлений // Теплофизика высоких температур. 1996. Т. 34, № 6. С. 919–923.
10. Шваб В. А., Лошкарёв В. А. Некоторые вопросы исследования абляционного разрушения теплозащитных покрытий на основе высокополимеров // Физика горения и взрыва. 1973. Т. 9, № 6. С. 800–807.
11. Дульнев Г. И., Пилипенко Н. В. Об измерении нестационарных тепловых потоков с помощью тепломеров // Инж.-физ. журн. 1975. Т. 29, № 5. С. 814–820.
12. Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976.
13. Абалтусов В. Е., Исаков Г. Н. Экспериментальное исследование процессов нестационарного тепло- и массообмена реагирующих тел с потоком нагретого газа // Физика горения и взрыва. 1973. Т. 9, № 6. С. 807–812.
14. Геращенко О. Л. Основы теплотрии. Киев: Наук. думка, 1971.
15. Панкратов Б. М., Полежаев Ю. В., Рудько А. К. Взаимодействие материалов с газовыми потоками. М.: Машиностроение, 1976.
16. Гришин А. М. Математическое моделирование некоторых нестационарных аэротермомических явлений. Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 1973.
17. Вилюнов В. Н. Теория зажигания конденсированных систем. Новосибирск: Наука, 1984.
18. Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983.
19. Еремин В. Н. Основы химической кинетики. М.: Высш. шк., 1976.
20. Левин Э. Д. Причины, обуславливающие знак и величину теплового эффекта пиролиза // Химия древесины. 1964. Т. 4, № 1. С. 57–68.
21. Исаков Г. Н., Мамонтов Г. Я., Несмелов В. В. Оценка термической стойкости полимерных композиционных материалов по данным высокотемпературного нагрева, ДТА. ТГА // Тр. Всесоюз. совещ. по термическому анализу. Рига, 1979. Т. 2. С. 12–13.

*Поступила в редакцию 11/XI 2002 г.,
в окончательном варианте — 16/XII 2002 г.*