

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ
ГОМОГЕННЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ,
АРМИРОВАННЫХ ТЕПЛОПРОВОДНЫМИ НИТЯМИ**

*В. П. Белов, В. Ф. Беседовский, А. Я. Румянцев,
Г. Г. Шелухин*

Ранее было установлено, что горение гетерогенных конденсированных систем в стационарных условиях является локально-колебательным [1]. Параметры локально-колебательного горения зависят от давления, т. е. от теплового потока, поступающего из газовой фазы в конденсированную.

Для подтверждения общности локально-колебательного режима горения представляет интерес выяснение процесса горения при изменении метода подвода теплового потока в реакционную зону конденсированной фазы. Это можно осуществить, например, вмонтировав в образец конденсированной системы (КС) теплопроводную нить: поверхность образца КС, отстоящая от нити, получает тепло непосредственно от газовой фазы, а слои образца, примыкающие к нити, получают тепло и от боковой поверхности нити.

В экспериментах исследовался характер перемещения вершины конуса, образующегося вокруг теплопроводной нити. Методика эксперимента включала микрокиносъемку с помощью кинокамер «Конвас» и СКС-1М, микротермопарные измерения, измерения мгновенной скорости горения и параметров локально-колебательного горения. Методики измерения описаны в работе [1].

Эксперименты проводились при атмосферном давлении на прямоугольных образцах торцевого горения размерами $20 \times 20 \times 50$ мм³ с заделанной вдоль оси теплопроводной нитью. Для четкой визуализации конуса, образующегося у нити, образец просвечивался мощной осветительной установкой, созданной на базе ртутно-дуговой лампы высокого давления НВО-500. Для повышения качества визуализации в оптическую схему стенда были включены поляризатор и анализатор. Подобная схема позволила качественно просвечивать обладающие прозрачностью образцы из гомогенных КС типа пороха Н толщиной от 4 до 20 мм.

При прохождении потока поляризованного света через КС с неоднородным температурным полем происходит изменение его интенсивности в соответствии с неоднородностью поля. При регистрации на пленку это находит свое отражение в степени почернения соответствующих участков кинограммы, что позволяет дополнительно выявить структуру конденсированной фазы в зоне горения.

Обработка кинограмм показала, что в процессе горения как на поверхности конуса, так и в его вершине непосредственно у теплопроводной нити имеет место колебательный режим горения, т. е. чередо-

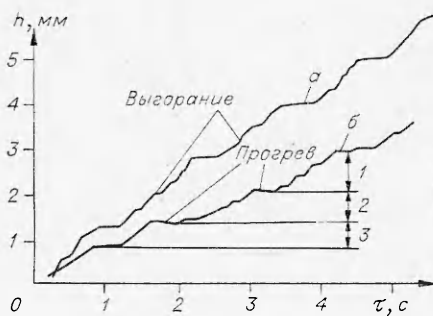


Рис. 1. Перемещение поверхности горения в функции времени.

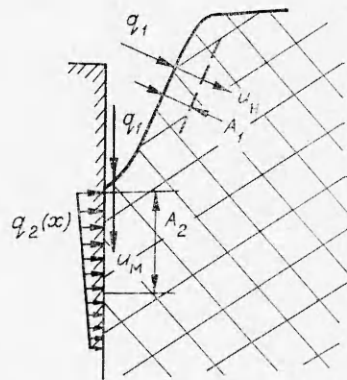


Рис. 2. Схема тепловых потоков в области горения.

вание быстрых перемещений поверхности с последующим замедлением или даже остановками. На образующей конуса вне зоны влияния нити частота и амплитуда перемещений соответствует величинам, полученным при горении обычных, не имеющих теплопроводных нитей, образцов КС в идентичных условиях (рис. 1, б). В вершине же конуса амплитуда выгорания вдоль нити оказывается значительно больше (рис. 1, а). Объясняется это следующим.

Характеристики колебательного режима для КС данного состава определяются величиной теплового потока, поступающего в реакционную зону конденсированной фазы. Для данной КС в определенных условиях характерен тепловой поток q_1 , поступающий из газовой фазы. Этому тепловому потоку соответствует время подготовки к выгоранию очередного слоя КС— τ_1 , толщина выгорающего слоя A_1 и нормальная скорость горения u_n (рис. 2). На зону КС, прилегающую к теплопроводной нити, помимо теплового потока q_1 из газовой фазы воздействует поступающий от боковой поверхности нити переменный по ее длине тепловой поток $q_2(x)$.

Величина потока q_2 меньше потока q_1 в результате того, что тепло, поступающее в нить, интенсивно отводится от нити и распределяется на значительной ее длине. Малый по сравнению с металлической нитью коэффициент теплопроводности КС определяет небольшую долю тепла, идущую на нагрев слоев КС, граничащих с нитью.

Воздействие теплового потока от теплопроводной нити заключается в подогреве КС, что равнозначно повышению начальной температуры окружающих нить слоев КС. Экспериментальные данные подтверждают это. Киносъемка процесса горения показывает, что периодическое выгорание слоев КС на границе с теплопроводной нитью всегда начинается с вершины конуса ускоренного горения и распространяется вдоль нити, а не по нормали к ней. Горение по нормали к нити наблюдается только при дополнительном сильном подогреве нити электрическим током.

Сравнение температурных профилей, получаемых термометрическими измерениями, показывает, что протяженность температурного профиля КС на границе с нитью существенно больше протяженности соответствующего профиля вне зоны влияния теплопроводной нити (рис. 3). При этом, чем выше теплопроводность нити, тем до большей глубины вдоль нити прогревается КС.

Таким образом, на границе с теплопроводной нитью под действием теплового потока q_1 из газовой фазы осуществляется колебательный режим горения КС, имеющей повышенную начальную температуру за счет дополнительного подогрева тепловым потоком q_2 от боковой по-

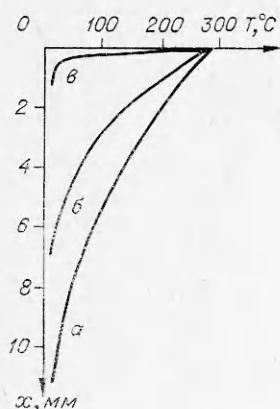


Рис. 3. Температурные профили в конденсированной фазе на границе с нитью из меди (а) и платины (б) и вне зоны влияния нити (в).

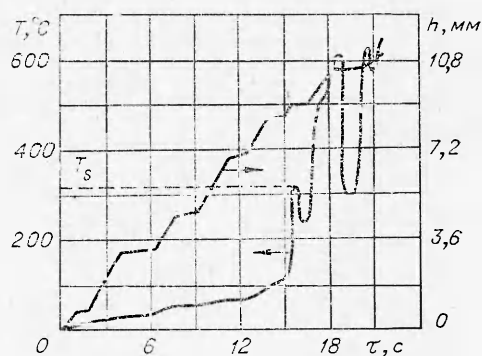


Рис. 4. Совместный график перемещения поверхности горения и изменения температуры во времени.

верхности нити. При этом толщина A_2 слоя КС, выгорающая за один цикл, больше A_1 , а местная скорость горения $u_m = A_2/\tau_1$ больше нормальной скорости горения u_n .

Расстояние A_2 для КС данного состава при одних и тех же условиях зависит от тех факторов, которые определяют распределение тепла вдоль теплопроводной нити, в частности от материала и диаметра нити. Увеличение теплопередачи от нити в глубь КС за счет изменения ее диаметра в пределах 0,05—0,5 мм ведет к росту A_2 в 1,5—2 раза. Подобный же эффект наблюдается при увеличении теплопроводности материала нити. Для нити из меди и платины одинакового диаметра A_2 отличается в 1,5—2 раза.

Анализ кинограмм процесса горения позволил проследить динамику образования вдоль нити той части прогретого слоя, в пределах которой заметно меняется плотность почернения киноплетки. Термопарные измерения показали, что в фиксируемом на пленке слое температура изменяется от 320 (температура поверхности) до 70—80°C. По толщине этого слоя, достигающего в отдельных случаях 6—7 мм, плотность почернения киноплетки, полученной с использованием поляризованной подсветки, постоянно увеличивается по мере удаления от поверхности горения. На нижней границе слоя почернение становится близким к почернению КС за пределами теплового слоя.

Толщина выгорающего за цикл слоя A_2 составляет часть фиксируемого на пленке прогретого слоя. Граница, до которой происходит выгорание КС у теплопроводной нити, имеет температуру 220—230°C. Эта температура фиксируется в КС термопарой в момент начала выгорания слоя. Характерно, что на кинограмме процесса горения можно достаточно четко выделить этот слой. Он проявляется на пленке в виде более светлой по сравнению с остальной частью прогретого слоя зоны. В периодическом процессе горения к началу очередного выгорания толщина этой зоны с малой плотностью почернения наибольшая. В период стадии быстрого выгорания толщина ее существенно уменьшается. Затем во время медленного перемещения поверхности горения или ее неизменного состояния (период подготовки) происходит рост отмеченной зоны, и к началу следующей стадии быстрого выгорания она становится вновь максимальной.

Толщина фиксируемого вдоль нити прогретого слоя и зоны с температурой на нижней границе 220—230°C зависит от теплопроводности и диаметра нити. Так, для нити из меди максимальные значения этих

толщин составляют соответственно 6 и 1,5 мм. Для нити того же диаметра из платины эти величины равны 3 и 0,8 мм.

Интересные результаты получены при измерении температуры термопарой, одним из термоэлектродов которой служит сама теплопроводная нить. Зафиксированы колебания температуры в газовой фазе с периодичностью, соответствующей периодичности выгорания КС в вершине конуса (рис. 4). В моменты выгорания слоев КС температура газовой фазы повышается. В период подготовки КС к выгоранию температура понижается до момента выгорания очередного слоя. Переменность температуры газовой фазы свидетельствует о переменности теплового потока, поступающего из газовой в конденсированную фазу, что в свою очередь определяет колебательный характер температуры в конденсированной фазе и скорости горения (см. рис. 4).

Таким образом, в результате экспериментального исследования показано, что колебательный режим горения проявляется и в специфических условиях горения КС, армированных теплопроводными нитями. Периодичность выгорания КС соответствует периодическому изменению теплового потока, поступающего в конденсированную фазу из газовой. Толщина слоя КС, выгорающего вдоль нити, зависит от геометрических и теплофизических характеристик теплопроводной нити.

Ленинградский механический институт

*Поступила в редакцию
10/VI 1975*

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Г. Шелухин, В. Ф. Булдаков, В. П. Белов. ФГВ, 1969, 5, 1.

НЕИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА ПОЛИМЕРИЗАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ. ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ РЕАКТОР КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ

Г. Б. Манелис, Л. П. Смирнов, Н. И. Перегудов

В [1] были представлены результаты теоретического исследования макрокинетических закономерностей полимеризации в периодическом реакторе без перемешивания для случая цилиндрического сосуда неограниченной длины. Учет теплообмена цилиндрического реактора с окружающей средой с торцевых поверхностей представляет интерес, поскольку подобный теплообмен может привести к существенным эффектам в развитии химической реакции. В теории теплового взрыва обычно рассматривается случай цилиндрического сосуда бесконечной длины [2—4], поэтому исследование нестационарных полей температуры в цилиндре конечной длины важно и для развития теории теплового взрыва.

Система безразмерных уравнений, описывающая существенно нестационарное протекание химической реакции в рассматриваемом реакторе в тех же предположениях, что и в работе [1], может быть записана в следующем виде:
уравнение теплового баланса

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \exp[\theta/(1+\beta\theta)] f(\eta) + 1/\delta (1/\xi \cdot \partial \theta / \partial \xi + \partial^2 \theta / \partial \xi^2 + \partial^2 \theta / \partial \zeta^2), \quad (1)$$