

Образование углеродных нитей при самораспаде ацетилена при температуре 1300—1400°С наблюдалось, по-видимому, впервые. Возможно, их появление связано с катализирующим действием стенок реактора.

Поступила в редакцию
15/VIII 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. А. Иванов. Физика взрыва ацетилена. М., «Химия», 1969.
2. А. А. Теснер, Б. И. Шраер и др. 3-й Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. Автореф. докл. Черноголовка, 1971, стр. 321.
3. Е. Я. Робинович, Т. Д. Снегирева, П. А. Теснер. Тр. ВНИИГАЗ. Переработка и транспорт природных газов. Гостоптехиздат, 1953, стр. 55.
4. M. Vre g a z i. Electricchemical Technology, 1967, 5, 507.
5. H. S t a h m e r a. o. Chemische Technik, 1965, 12, 715.
6. Б. А. Иванов, С. М. Когарко. ПМТФ, 1964, 2, 164.

УДК 662.58

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЯ В УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ

Ю. А. Гальченко, Ю. М. Григорьев, А. Г. Мержанов
(Москва)

В работе [1] электротермографическим методом изучено воспламенение алюминиевых проволок в среде чистого кислорода. Было показано, что за индукционный период воспламенения окисная пленка на поверхности алюминия существенно увеличивает свои размеры, а температура воспламенения проволоки может быть значительно ниже температуры плавления α модификации Al_2O_3 (наибольшее отклонение составляет около 400°). В плане дальнейшего изучения механизма процесса в настоящей работе исследовались закономерности воспламенения алюминиевой проволоки в среде углекислого газа, являющегося одним из возможных окислителей алюминия.

Методика эксперимента аналогична [1]. В опытах проволока помещалась в длинный прямоугольный реактор и обдувалась потоком газа с различными скоростями. Использовались нити диаметром $d=50$ мкм. Условия нагрева соответствуют постоянству электрической мощности, выделяемой на исследуемом образце.

Результаты экспериментов

При нагревании алюминиевых нитей в среде углекислого газа реализуются три режима процесса. На рис. 1, 2 приведены термограммы нагрева и значения максимальных температур проволоки при различных значениях электрических мощностей P (электрическая мощность, выделяемая на проволоке, отнесена к единице поверхности нити).

При малых значениях мощностей имеет место режим медленного окисления (обл. I, рис. 2), характеризующийся достижением с течением времени стационарной температуры проволоки (рис. 1, 1—5). На термограммах видны участки стадии плавления алюминия. Значения максимальных температур проволоки увеличиваются с ростом P . В области II процесс нагрева проволоки заканчивается ее воспламенением (рис. 2,

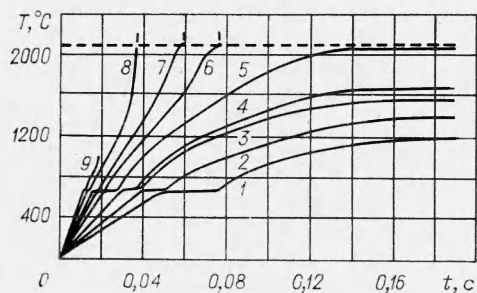


Рис. 1. Термограммы нагрева проволок в углекислом газе при скорости потока $v = 5,6$ см/с. Предел воспламенения ($\Delta = P/P_*$): 1—0,4; 2—0,5; 3—0,63; 4—0,68; 5—0,84; 6—1,04; 7—1,22; 8—1,65; 9—1,83.

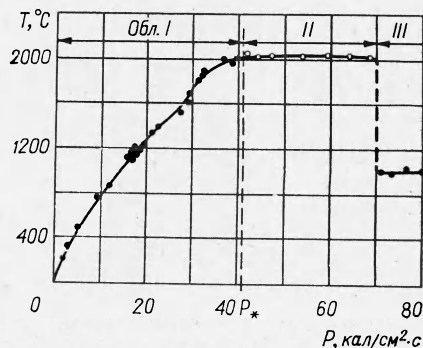


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры проволоки от электрической мощности при $v = 5,6$ см/с.

6—8). Области медленного окисления и воспламенения разделены критическим значением P_* , зависящим от условий проведения экспериментов.

Визуальные наблюдения показывают, что проволока воспламеняется на отдельном участке, от которого по направлению к токоподводящим контактам распространяется диффузионное пламя, по размерам значительно превышающее диаметр нити и имеющее голубоватое свечение. Температура воспламенения нити T_B (значение температуры проволоки в момент ее воспламенения) в области II не зависит от степени удаления от предела воспламенения и близка к температуре плавления $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

При больших значениях электрических мощностей ($P \geq 70$ кал/см²·с) происходит разрушение нити при температурах $\sim 1000^\circ\text{C}$ без последующего воспламенения (рис. 2, обл. III; рис. 1, 9).

На рис. 3 приведены значения температуры воспламенения нити T_B , а также критической мощности воспламенения P_* , при различных скоростях потока углекислого газа v . С ростом v значение критической

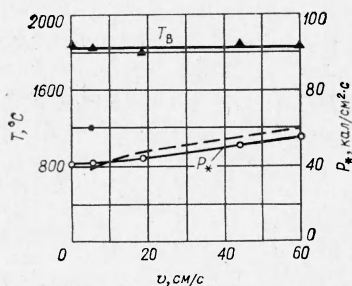


Рис. 3. Зависимость температуры воспламенения и критической мощности воспламенения от скорости потока углекислого газа.

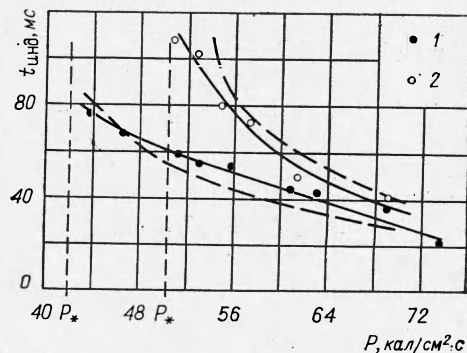


Рис. 4. Зависимость периодов индукции воспламенения проволоки от электрической мощности при скоростях потока газа, см/с: 1—5,6; 2—42,3.

мощности P_* увеличивается, что является следствием возрастания коэффициента теплоотдачи, однако при этом температура воспламенения $T'_в$ остается постоянной и равной 2060°C .

Таким образом, в среде углекислого газа вне зависимости от скорости потока (в исследованном диапазоне) и степени удаления от критических условий температура воспламенения алюминиевой проволоки близка к температуре плавления окисной пленки на поверхности металла.

Значения периодов индукции воспламенения проволоки $t_{\text{инд}}$, представляющие собой времена от момента включения тока до момента воспламенения, при различных значениях электрических мощностей и скоростей потока газа приведены на рис. 3. Отсюда видно, что значения $t_{\text{инд}}$ зависят как от скорости потока, так и от величины электрической мощности.

Обсуждение результатов

Как следует из полученных данных, в атмосфере углекислого газа необходимым условием воспламенения алюминиевой проволоки является достижение температуры плавления окисной пленки на поверхности металла. При этом термограммы нагрева проволок (см. рис. 2) показывают, что момент воспламенения нити соответствует времени достижения этой температуры. Таким образом, воспламенение алюминия в CO_2 соответствует модели Фридмана и Мачека [2], согласно которой при $T < T'_1$ взаимодействия между металлом и окисляющим газом через окисную пленку практически не происходит, а при $T > T'_1$ оно протекает настолько быстро, что приводит к воспламенению. По [2] решающее значение для воспламенения имеет не плавное (хотя и экспоненциальное) уменьшение диффузионного сопротивления пленки с ростом температуры, а скачкообразное при $T = T'_1$.

В рамках модели Фридмана — Мачека произведем абсолютный расчет характеристик воспламенения проволоки. Величина критической мощности воспламенения (минимальное значение электрической мощности, которое необходимо сообщить проволоке для ее воспламенения) может быть найдена из условия равенства температуры проволоки в стационарном режиме при отсутствии химического тепловыделения на ее поверхности и температуры плавления окисной пленки:

$$P_* = (T'_1 - T_0) \alpha. \quad (1)$$

Для вычисления периодов индукции воспламенения может быть использована формула

$$t_{\text{инд}} = t_1 + t_2, \quad (2)$$

где $t_1 = -(c_p \rho r / 2\alpha) \ln [1 - \alpha (T'_1 - T_0) / P]$ — время прогрева проволоки по закону инертного тела до температуры T'_1 , а $t_2 = r \rho L / 2 [P - \alpha (T'_1 - T_0)]$ — время плавления алюминия. Результаты расчета величин P_* и $t_{\text{инд}}$ по формулам (1), (2) представлены пунктирными линиями на рис. 3, 4.

При вычислениях принималось: $T'_1 = 2060^\circ\text{C}$, $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $\rho = 2,05 \text{ г/см}^3$, $c_p = 0,26 \text{ кал/г}\cdot\text{град}$, $L = 93,4 \text{ кал/г}$, $r = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ см}$. Значение коэффициента теплоотдачи α , входящее в (1), (2), находилось по формуле

$$\alpha = \frac{\lambda}{2r} (0,40 + 0,66 \text{ Pr}^{0,35} \sqrt{\text{Re}}), \quad (3)$$

которая получена обработкой специальных опытов по теплообмену н платиновой нити диаметром 50 мкм в диапазоне температур 200—1450°С и скоростей потока 5—60 см/с. Теплофизические параметры, входящие в (3), отнесены к средним температурам между проволокой и потоком.

В общем случае теплообмен нити с потоком является сложным процессом и определяется совместным действием конвекции и излучения. Наряду с этим на величину коэффициента теплоотдачи оказывает влияние состояние поверхности металла (адсорбционно-дисорбционный механизм), которое наиболее заметно в высокотемпературной области [3]. Наши измерения показывают, что результирующий коэффициент теплоотдачи для алюминиевой проволоки удовлетворительно описывается формулой (3).

Как видно из приведенных данных, расчет характеристик воспламенения проволоки, в основу которого заложены представления об инертном нагреве, находится в удовлетворительном соответствии с результатами экспериментов, что свидетельствует о слабом характере взаимодействия алюминия с углекислым газом при $T < T_1'$.

Остановимся на применении различных подходов для теоретического описания процесса воспламенения алюминия. Как уже отмечалось, при воспламенении проволоки в среде чистого кислорода, в отличие от углекислого газа, срыв теплового равновесия на поверхности нити может происходить при температурах, значительно меньших температуры плавления Al_2O_3 . Этот факт противоречит концепции Фридмана—Мачека [2] и получил подтверждение в тепловой теории воспламенения, развитой в [4], согласно которой характеристики воспламенения определяются законами взаимодействия металла и окислителя через окисную пленку и условиями теплоотдачи. При идентичных условиях теплообмена величина эквивалентной критической температуры самовоспламенения¹ проволоки $T_{экр}^* = T_0 + P_* / \alpha$ [1] существенным образом зависит от интенсивности химического тепловыделения при взаимодействии через окисную пленку. По существу, противоречий между этими точками зрения нет. В сильных окислителях (типа O_2 , H_2O) $T_{экр}^*$ может быть меньше температуры плавления окиси алюминия T_1' , и в этом случае срыв теплового равновесия наступает раньше плавления окисной пленки. В слабых окислителях (типа CO_2 , CO и т. д.), наоборот, $T_{экр}^*$ может быть больше T_1' , и при этом плавление окисной пленки и связанное с ним скачкообразное уменьшение диффузионного сопротивления будет являться определяющим фактором в механизме процесса воспламенения. Таким образом, критерием применимости тепловой модели воспламенения [4] и модели Фридмана—Мачека [2] является критическая температура самовоспламенения $T_{экр}^*$, определяемая на основе данных по кинетике окисления и теплообмена. При $T_{экр}^* < T_1'$ справедлива модель [4], при $T_{экр}^* > T_1'$ — модель [2]. Следует отметить, что $T_{экр}^*$ зависит от условий проведения процесса, и поэтому даже для одного и того же окислителя может наблюдаться смена механизмов воспламенения.

Поступила в редакцию
19/VII 1972

¹ При воспламенении сферических частиц металлов в нагретом газе эта величина, как показано в [1], является аналогом критической температуры нагретого газа $T_{0ф}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Мержанов, Ю. А. Гальченко, и др. В сб. «Горение и взрыв» (Материалы 3-го Всесоюз. симпозиума по горению и взрыву). М., «Наука», 1972.
2. R. Friedman, A. Masek. Combust. flame, 1962, 6.
3. Я. Х. Бур. Динамический характер адсорбции. Пер. с англ. М., 1962.
4. Б. И. Хайкин, В. Н. Блошенко, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1970, 6, 4.

УДК 662.58

ЗАЖИГАНИЕ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ НАКАЛЕННЫМ ТЕЛОМ КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ

У. И. Гольдшлегер, К. В. Прибыткова, В. В. Барзыкин
(Москва)

Закономерности воспламенения за счет контакта взрывчатого вещества с нагретым инертным телом представляют интерес главным образом в связи с проблемой чувствительности ВВ к механическим воздействиям. Наиболее распространенной концепцией в теории чувствительности является принятие тепловой природы возбуждения взрыва. Считается [1], что при различных механических воздействиях возникают (за счет диссипации энергии внешнего воздействия) локальные очаги разогрева, из которых и развивается взрыв. Не вдаваясь в механизм возникновения очагов, можно разделить их по формальному признаку на две группы — реагирующие и инертные. В первом случае имеет место локальный разогрев ВВ, приводящий к очаговому тепловому взрыву [2]. В случае инертных очагов, возникающих, например, за счет адиабатического сжатия газовых включений при трении ВВ о твердые частички и т. п., процесс развивается вблизи поверхности контакта горячего инертного вещества и холодного ВВ, т. е. является процессом зажигания.

Задача о зажигании ВВ накаленным телом представляет интерес в связи с изучением зажигания дисперсным потоком [3] для оценки роли внедрения частиц в поверхность воспламеняемого вещества.

В работе [4] численными методами был рассмотрен один из предельных случаев — зажигание инертной пластиной с плохой теплопроводностью. Другой предельный случай (поджигающее тело с хорошей теплопроводностью) изучался в работе [5]. Приближенный расчет основных характеристик процесса предложен в [4, 6].

В данной работе с помощью ЭВМ решена задача о зажигании ВВ накаленным телом симметричной формы (пластина, цилиндр, сфера) в широком интервале изменения параметров.

Постановка задачи обычна для теории зажигания. В безграничное вещество, способное к экзотермическому превращению в конденсированной фазе, помещается инертное накаленное тело с характерным размером $2r$. В начальный момент температура взрывчатого вещества — T_n , температура накаленного тела — T_0 . Выгорание не учитывается, т. е. вырожденные режимы [7] не рассматриваются. Величины, характеризующие теплофизические свойства (теплопроводность, теплоемкость,