

запрессовки образца пороха в нерасширяющуюся оболочку) при любом режиме нагрева.

2. При кратковременном нагреве свободное приклеивание зонда к поверхности не всегда обеспечивает необходимые условия измерения и для конечных размеров поверхности нагрева.

3. При свободном приклеивании зонда к поверхности в любом режиме нагрева в начале процесса контакт между зондом и поверхностью целиком определяется силами клея.

Автор признателен В. С. Зарубину за внимание к работе и полезные советы.

*Московское высшее  
техническое училище  
им. Н. Э. Баумана*

*Поступила в редакцию  
18/ХІ 1975*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. А. Поляков.— В сб.: Физическая газодинамика, теплообмен и термодинамика газов высоких температур. М., Изд-во АН СССР, 1962.
2. Ю. А. Поляков. ТВТ, 1968, 6, 1.
3. В. Ф. Михеев, А. А. Ковальский, С. С. Хлевной. ФГВ, 1968, 4, 1.
4. С. С. Хлевной, А. Н. Калмыкова. ФГВ, 1968, 4, 1.
5. А. Д. Бер, Н. В. Райан, Д. Л. Солт.— В кн.: Исследование ракетных двигателей на твердом топливе. М., ИЛ, 1963.
6. В. И. Розенбанд, В. В. Барзыкин, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1968, 4, 2.
7. В. Ф. Михеев, С. С. Хлевной, А. В. Худяков. ФГВ, 1966, 2, 2.
8. Д. Б. Балашов. ЖФХ, 1966, XL, 12, 3065.
9. А. В. Лыков. Теория теплопроводности. М., «Высшая школа», 1967.
10. Б. Е. Гейтвуд. Температурные напряжения. М., ИЛ, 1959.
11. В. И. Федосьев. Сопротивление материалов. М., «Наука», 1974.
12. Г. Б. Двайт. Таблицы интегралов и другие математические формулы. М., «Наука», 1966.
13. Дж. Кэй, Т. Лэби. Таблицы физических и химических постоянных. М., Физматгиз, 1962.
14. Я. Б. Зелдович, О. И. Лейпунский, В. Б. Либрович. Теория нестационарного горения пороха. М., «Наука», 1975.
15. Б. Боли, Дж. Уэйнер. Теория температурных напряжений. М., «Мир», 1964.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ТИТАНА В КИСЛОРОДЕ

*М. Е. Дервяга, Л. Н. Стесик, Э. А. Федорин*

Известно, что титан широко используется как конструкционный материал в технике в агрессивных средах и при высоких температурах. Представляет интерес температура воспламенения, как верхний температурный предел использования Ti. Кроме того, он может быть применен в качестве добавки к различным горючим смесям. Для TiO<sub>2</sub>, основного продукта взаимодействия Ti с кислородом, характерна большая теплота образования (3500 ккал/кг) и высокая температура кипения (~3000°C при 1 атм). В связи с этим может быть получен существенный энергетический эффект при его сгорании в смесях или достигнута высокая температура горения смеси. Представляет интерес изучение воспламенения Ti в динамическом режиме, т. е. при разогреве перед воспламенением в продуктах сгорания смеси.

Кроме практического приложения упомянутые вопросы интересны и с точки зрения общего подхода к вопросу воспламенения металлов в газах. Они исследовались в настоящей работе.

Изучался процесс воспламенения титана марки ВТ1-0 в чистом кислороде с применением метода индукционного разогрева образцов. Образцы диаметром 4—8 мм вытачивались из прутка.

Схема применяемой методики представлена на рис. 1. Образец 2 помещался в индуктор 1 типа обратного витка или соленоид, который питался от высокочастотной установки ЛЗ-13 мощностью 13 кВт. Образец изолировался от атмосферы с помощью стеклянной трубки 3, через которую продувался газ комнатной температуры со скоростью 20 см/с (скорость выбрана произвольно). Система подачи газа позволяла регулировать состав и скорость его подачи.

Температура образца фиксировалась оптическим пирометром ЭОП-51 и термопарой ВР 5/20, которая приваривалась к образцу. Сигнал с термопары поступал на усилитель с высоким входным сопротивлением (70 кОм), а затем записывался на шлейфовом осциллографе Н-105. Термопара в этих условиях градуировалась по точкам плавления металлов. Абсолютная ошибка измерения термопарой составляла  $\pm 15^\circ$ . Точность измерения пирометром ЭОП-51 в этом интервале температур составляла  $\pm 7^\circ$ . В случае необходимости проводилась киносъемка в процессе разогрева и воспламенения образца с помощью кинокамеры «Конвас». Для сброса образца использовался гидравлический затвор 4.

Индукционный метод для определения температуры воспламенения металлов использовался в ряде работ, среди которых следует отметить [1], в которой были определены температуры воспламенения бария, висмута, кальция, железа, магния, свинца, молибдена, стронция, олова и цинка. При определении температуры воспламенения титана важно, что данный метод позволяет проводить исследования при высоких температурах.

Эксперимент проводился следующим образом: образец разогревался до определенной температуры при обдуве его аргоном. После стабилизации температуры образец выдерживался в течение 2—5 мин, а затем аргон заменялся на кислород. Проводилось наблюдение — воспламеняется образец или нет.

Индукционный нагрев образцов осуществлялся как при выходе на постоянную температуру в аргоне, так и при воспламенении их в кислороде. Полученная таким способом температура воспламенения титановых образцов в кислороде при 1 атм в интервале исследованных размеров практически одинакова и равна  $1605^\circ\text{C}$ . Это значение на  $60^\circ$  ниже температуры плавления Ti.

Сопоставление с другими исследованиями было затруднено, так как известные из литературы результаты относятся к интервалу более низких температур и касаются воспламенения титана при повышенном давлении кислорода, обуславливающим существенное снижение температуры воспламенения образцов. Поэтому для сравнения была использована экстраполяция данных работы [2] в область более высоких температур и более низких давлений кислорода. Результаты экстраполяции показали удовлетворительное совпадение с результатами настоящей работы.

Метод индукционного разогрева для моделирования процесса разогрева частиц металла в газе, по-видимому, еще не использовался (широко применялся примерно аналогичный метод разогрева проволочек

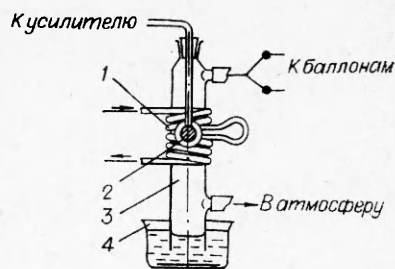


Рис. 1. Схема эксперимента.

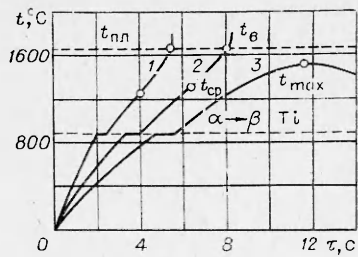


Рис. 2. Зависимость температуры образцов титана в кислороде от времени при отсутствии и наличии воспламенения.

Основными результатами опытов по этим методикам являются кривые разогрева образцов при их воспламенении или без него. Характер хода этих кривых для титана, отличающихся различной интенсивностью разогрева, показан на рис. 2. Кривые 1 и 2 относятся к случаю воспламенения, кривая 3 — к отсутствию воспламенения, при этом температура образца проходит через максимум и после некоторого снижения она устанавливается на постоянном уровне. Видно, что после фазового перехода  $\alpha \rightarrow \beta$  в титане, на кривых появляются характерные точки: точка перегиба, соответствующая температуре срыва теплового равновесия ( $t_{сп}$ ), и точка, в которой наблюдается появление пламени, соответствующая температуре вспышки ( $t_{в}$ ). На кривых, где воспламенение отсутствовало, фиксировалась температура максимального разогрева ( $t_{max}$ ).

Как оказалось, величина  $t_{в}$  не зависит от интенсивности нагрева и от диаметра образца. Из опытов с предварительным разогревом в аргоне, описанных выше, было видно, что она отличается от температуры самовоспламенения титана и соответствует примерно температуре его плавления. Согласно нашим наблюдениям в опытах, эту температуру можно отнести к моменту выхода парогазовой реакции из пор в окисной пленке в объем, окружающий образец.

В соответствии с методологией работы [3] для нахождения критических условий самовоспламенения строился график зависимости  $t_{сп}$ ,  $t_{в}$ ,  $t_{max}$  от интенсивности теплового разогрева образцов (диаметр образцов 5 мм). Результаты представлены на рис. 3, где по оси абсцисс отложено обратное время разогрева образцов до значений  $t_{сп}$ , пропорциональное интенсивности разогрева.

Следует заметить, что в работе [3] при исследовании воспламенения алюминиевых проволочек в кислороде строилась зависимость, состоящая из кривых 1 и 3. Однако нельзя согласиться с тем, что в качестве температур воспламенения использовалось не  $t_{сп}$ , а  $t_{в}$ , которое для алюминия было близко к точке плавления окиси алюминия, по-видимому, не имеющее отношения к температуре воспламенения. Если судить по кривым разогрева, приведенным в этой работе, то существовала возможность построения кривой типа 2.

металла электрическим током). Возможность моделирования процесса разогрева образцов в газе была обоснована в работе [3]. Это обоснование полностью отвечает и случаю индукционного разогрева, применяемого в настоящей работе. На этом основании проводилось сопоставление полученных данных с результатами работы [3] для воспламенения алюминия в кислороде, а также использовалась методология обработки экспериментальных данных, предложенная в ней.

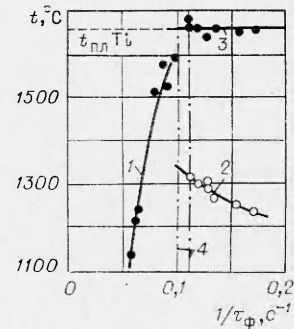


Рис. 3. Характер изменения  $t_{max}$  (1),  $t_c$  (2) и  $t_v$  (3) для титана в кислороде с ростом интенсивности индукционного нагрева ( $\sim 1/\tau_{\phi}$ ).

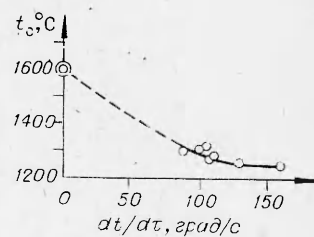


Рис. 4. Изменение  $t_c$  для титана в кислороде от величины, соответствующей первой производной температуры по времени.

В этом случае вид графика для алюминия должен быть аналогичен тому, который получен для титана на рис. 3.

На рис. 3, 4 отмечена граница областей, где воспламенение наблюдалось и где отсутствовало. В работе [3] предполагается, что граница соответствует условиям самовоспламенения. Однако отсутствие стыковки кривых 1 и 2 и проведенные замеры первой производной температуры показывают, что это не так. Для всех температур срыва теплового равновесия первая производная была достаточно велика. Следовательно, на границе этих областей не выполняется условие самовоспламенения, для которого характерно нулевое значение первой производной.

На рис. 4 представлена зависимость измеренных температур срыва теплового равновесия от соответствующих им значений производных. Здесь также нанесена температура воспламенения с предварительным разогревом в аргоне, которая, по-видимому, соответствует условиям самовоспламенения, т. е.  $dt/d\tau=0$ . Видно, что температуры воспламенения титана в динамическом режиме находятся в дальней области вынужденного воспламенения (большие значения производных (и приближение их к условиям самовоспламенения в опытах не реализуется).

Можно полагать, что и для алюминия будет иметь место аналогичная картина. Этот факт означает необходимость дальнейшей доработки теории воспламенения титана и алюминия в динамическом режиме. По нашему мнению, эта доработка должна быть основана на экспериментальном изучении механизма взаимодействия металла с кислородом при данных температурах. Согласно наблюдениям, в настоящих экспериментах, в случае титана, этот механизм соответствует режиму взаимодействия с растрескавшейся пленкой на металле со значительной долей парофазного окисления. Наличие парофазной реакции фиксировалось по наблюдениям в опытах выноса конденсированных продуктов реакции в газовый поток.

Тот факт, что воспламенение обуславливается реакцией при растрескавшейся окисной пленке на поверхности образцов, согласуется и с результатами работы [1], так же как и наличие двух характерных температур ( $t_{ср}$ ,  $t_{в}$ ) при воспламенении.

В результате проведенного исследования определена температура воспламенения титана в кислороде при 1 атм (1605°C). Установлено, что процесс воспламенения титана в кислороде характеризуется температурой срыва теплового равновесия и температурой вспышки, отличающихся на  $\sim 350^\circ$ . Критические условия воспламенения титана в кислороде и, по-видимому, алюминия в кислороде при разогреве соответствуют случаю вынужденного воспламенения. Условия самовоспламенения при этом не реализуются. Титан в кислороде воспламеняется в области растрескавшейся окисной пленки, что соответствует выводам работы [1]. Такое положение для металлов можно считать достаточно общим.

Отделение института химической  
физики АН СССР, Москва

Поступила в редакцию  
30/V 1975

#### ЛИТЕРАТУРА

1. N. M. Laurendeau, J. Glassman. *Combust. Sci. Technology*, 1971, 3, 77.
2. F. E. Littman, F. M. Church, E. M. Kinderman. *J. Less — Common Metals*, 1961, 3, 367.
3. А. Г. Мержанов, Ю. А. Гальченко и др. — В сб.: *Горение и взрыв*. М., «Наука», 1972, с. 245.