

качественно согласуется с результатами, полученными из теоретической модели. Однако узкий диапазон варьирования по дисперсному составу без учета влияния массовой концентрации при проведении экспериментов не дает возможности оценить достоверность результатов теории для всей области параметров.

К сожалению нам неизвестны описанные в литературе целенаправленные экспериментальные исследования влияния массовой концентрации газовой смеси на минимальную энергию зажигания при неизменной дисперсности твердой фазы (за исключением единичных работ [1, 2] по качественному анализу влияния k на A_i при фиксированных r_0). Теория предсказывает зависимость $A_i(k)$.

Таким образом, в результате построения математической модели получена оценка влияния параметров пылегазового облака на минимальную энергию зажигания. Результаты теории представлены в виде аппроксимационных формул, которые дают возможность оценить величину энергии искрового источника, способного вызвать воспламенение пылевого облака с дальнейшим выходом на режим послойного горения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Таубкин С. И., Таубкин И. С. Пожаро- и взрывоопасность пылевидных материалов и технологических процессов их переработки.— М.: Химия, 1976.— 264 с.
2. Корольченко А. Я. Пожаровзрывоопасность промышленной пыли.— М.: Химия, 1986.— 216 с.
3. Взрывобезопасность электрических разрядов и фрикционных искр/Под ред. В. П. Бондаря.— Л.: Химия, 1974.— 486 с.
4. Монахов В. Т. Методы исследования пожарной опасности веществ.— М.: Химия, 1979.— 424 с.
5. Губин Е. И., Дик И. Г. О зажигании пылевого облака искрой // ФГВ.— 1986.— 22, № 2.— С. 10—17.

г. Томск

Поступила в редакцию 2/VI 1992

УДК 669.295;620.193

В. И. Болобов

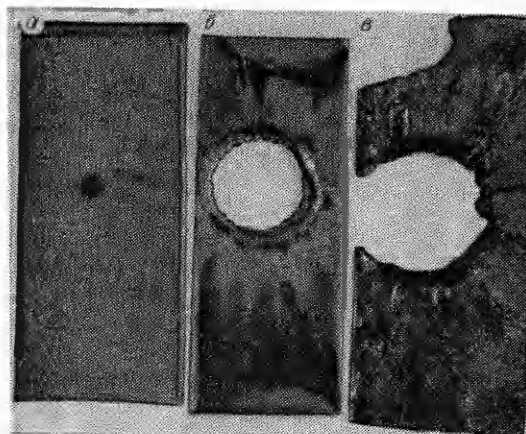
ВОЗГОРАНИЕ ТИТАНА В ПОТОКЕ КИСЛОРОДА

Представлены результаты экспериментов, свидетельствующие о возможности самопроизвольного возгорания компактных образцов пяти марок титановых сплавов при их обдуве потоком кислорода. Определены минимальные (критические) значения полного давления кислорода в месте воздействия потока на поверхность, при которых воспламеняются материалы. Высказано предположение, что возгорание титановых сплавов инициируют разряды статического электричества, возникающие в потоке вследствие электризации капелек и частичек воды и других примесей, содержащихся в кислороде.

Известна способность титана и его сплавов возгораться при нормальной температуре в кислороде, проявляющаяся в случае разрушения титановой конструкции при давлении кислорода выше некоторого критического значения $p_{кр}$ [1—5]. В настоящей работе представлены результаты экспериментов, свидетельствующие о возможности самопроизвольного возгорания образцов титановых сплавов в потоке кислорода без специального разрушения.

Объектом испытаний служили образцы ($13 \times 30 \times 1,5 \div 4,5$ мм) технического титана ВТ1-0, ВТ1-1 и промышленных сплавов ОТ4, ВТ6, ВТ14. Образец жестко крепился в металлическом держателе на фиксированном расстоянии ($l = 1,0 \div 6,0$ мм) перед срезом насадка (металлический шпатель с отверстием диаметром $d = 1,2 \div 3,0$ мм). Последний через клапан соединялся трубопроводом с емкостью, заполненной газо-

Рис. 1. Образцы титана ВТ1-10 (×3) после воздействия потока кислорода.
p, МПа: а) 19 (< *p*_{кр}); б) 20 (*p*_{кр}); в) 25 (> *p*_{кр}).



образным кислородом ($p_0 \leq 70$ МПа, $T_0 = 300$ К). После открытия клапана широкая сторона образца 1—3 с обдувалась потоком кислорода (угол атаки 90°), истекающего из отверстия насадка с критической скоростью ($w_{кр} \approx 340$ м/с). Опыты проводились при ступенчатом поднятии давления в емкости (с шагом 1 МПа) и десяти пусках кислорода для каждого значения p_0 . Вся установка размещалась в воздушной атмосфере в боксированном помещении и обеспечивалась дистанционным управлением.

Для определения величины полного давления кислорода у металлической поверхности p_w при обдуве с использованием датчика давления (ДДМ100) проводились специальные тарировочные испытания на образцах, снабженных отверстием, выполненным в месте воздействия потока. В других опытах термоэлектрическим методом фиксировалась температура поверхности обдуваемого образца.

Установлено, что при достаточно высоком давлении кислорода в емкости (p_0) воздействие его высокоскоростного потока на образец в ряде случаев способно вызвать возгорание титановой поверхности. Интенсивность горения и процент выгоревшей части образца с увеличением p_0 возрастают (рис. 1). Минимальное (критическое) давление $p_{кр}$, при котором воспламеняются образцы, существенно не изменялось при уменьшении их толщины (от 4,5 до 1,5 мм) и оказалось зависящим от расстояния от образца до среза насадка и диаметра отверстия.

Результаты тарировочных испытаний показали, что от указанных параметров зависит и величина полного давления у поверхности образца, удовлетворительно описываемая уравнением вида:

$$p_w = Ap_0 \exp\left(-B \frac{l}{d}\right), \quad (1)$$

где $A \approx 0,49$; $B \approx 0,65$.

При пересчете значений $p_{кр}$, полученных для различных сочетаний l и d , оказалось, что критические условия возгорания образцов достигаются при определенной для каждого сплава величине полного давления

Марка сплава	Критическое давление возгорания образцов (МПа) в условиях	
	обдува потоком	разрыва [1, 2]
ВТ1-1	7,7	2,0÷2,5
ВТ14	7,0	1,3
ОТ4	6,5	1,0
ВТ1-0	5,2	—
ВТ6	3,1	0,8

кислорода в месте воздействия потока на поверхность $p_{wкр}$. Значения указанного критического давления для исследованных материалов приведены в таблице. Там же для сравнения представлены величины $p_{кр}$ аналогичных сплавов, зарегистрированные [1, 2] при механическом разрушении образцов в кислороде в условиях естественной конвекции. Видно, что установленный в настоящих экспериментах порядок распре-



Рис. 2. Свечение газового потока между насадком (слева) и образцом титанового сплава ВТ6 в виде коронного разряда ($l = 5$ мм, фотоаппарат «Зенит», киноплёнка КН-4, фильтр СС-7, $\times 2$).

деления сплавов по сравнительной стойкости к возгоранию совпадает с определенным в других условиях.

В работе [6] возгорание предварительно нагретых образцов металлов, в том числе и титана, в сверхзвуковом воздушном потоке повышенной температуры объясняется доразогревом образцов до температуры воспламенения вследствие превращения кинетической энергии газовых молекул в тепловую. Данная версия не могла быть принятой для объяснения самопроизвольного возгорания титана в описываемых экспериментах, поскольку образцы при обдуве из-за дросселирования газа охлаждаются до $270 \div 280$ К.

Необоснованным представлялось и предположение, что кинетическая энергия молекул кислорода достаточна для разрушения окисной пленки на титане с образованием ювенильной металлической поверхности.

Наиболее обоснованное, по мнению автора, объяснение экспериментальных данных получено из визуальных наблюдений и фотосъемки процесса обдува образцов газовым потоком, в результате которых были отмечены следующие закономерности:

— в момент пуска кислорода в промежутке между срезом насадка и образцом в ряде случаев фиксируется свечение в виде коронного разряда или искр (рис. 2); на поверхности образца после этого в месте воздействия потока обнаруживается темное пятно (см. рис. 1, а);

— свечение в потоке регистрируется и при замене материала металлического образца (на нержавеющую сталь, медь, бронзу), при его удалении — пропадает;

— в случае неметаллической преграды или наличия на образце неметаллического покрытия (эмали, лака, фторопласта, силикатного стекла) свечение в потоке не обнаруживается; указанное свечение имеет место и при обдуве металлического образца азотом высокого давления;

— свечение потока, а также возгорание образцов титана носят статический характер и чувствительны к условиям проведения экспериментов; в серии опытов свечения и возгорания титана не наблюдалось при обдуве образцов потоком вплоть до давлений кислорода в емкости 70 МПа.

Исходя из установленных закономерностей логично было предположить, что возгорание титана инициирует электрический разряд, возникающий в потоке. При этом, как и при поджигании титана искрой от катушки Румкорфа [7], разряд пробивает окисный слой (образуется ювенильная поверхность металла) и дает местный разогрев. Если полное давление кислорода в месте разряда достаточно ($p_w \geq p_{wкр}$) для обеспечения окисления ювенильной поверхности со скоростью выше некоторого порогового значения, образец воспламеняется.

По поводу причины возникновения электрических разрядов в условиях настоящих экспериментов можно отметить следующее.

Известно [8], что истечение жидкостей и паров через отверстия с большой скоростью способно вызвать сильную электризацию и искровые разряды, которые инициируют взрывы горючих смесей. В газах значительные разряды не появляются, однако часто возникают на взвешенных в них твердых и жидких частицах. Описан взрыв газовой смеси при продувке резервуара двуокисью углерода [9]. Заряды возникали на частицах твердой CO_2 при ее кристаллизации в процессе дросселирования. В этой связи можно предположить, что и в нашем случае причиной искрообразования является электризация капелек и частичек воды и других примесей, содержащихся в исходном кислороде (азоте), имеющая место при критическом истечении газа высокого давления из насадка и омывания им металлической поверхности.

В соответствии с предложенной схемой, воспламенение титана в потоке окислительной среды высокого давления обусловливается возгоранием образующейся ювенильной поверхности металла. Поэтому можно предположить, что при повышении температуры потока до уровня, достаточного для воспламенения ювенильной поверхности других металлических материалов (например, до 1300 К для нержавеющей стали [10]), конструкции из указанных материалов при обдуве также будут воспламеняться. Вследствие практической важности обеспечения безопасной эксплуатации оборудования, контактирующего с окислительными средами высокого давления, данный вопрос требует дальнейшего изучения.

Автор выражает благодарность А. А. Прокофьеву и А. Н. Кольцову за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисова Е. А., Барданов К. В. О загорании титановых сплавов в кислородсодержащих средах // Цветная металлургия.— 1963.— № 2.— С. 47—48.
2. Борисова Е. А., Барданов К. В. Загорание титановых сплавов в кислородсодержащих средах // Металловедение и термическая обработка металлов.— 1963.— № 2.— С. 37—40.
3. Littman F. E., Church F. M., Kinderman E. M. The spontaneous ignition of titanium // J. of the Less-Common Metals.— 1961.— N 3.— P. 367—378.
4. Дерябина В. И., Колготин П. Н., Лукьянов О. П. и др. Возгорание низколегированного титанового сплава при разрыве в кислородсодержащих газах // Физико-химическая механика материалов.— 1971.— № 1.— С. 16—19.
5. Болобов В. И., Макаров К. М., Прокофьев А. А. О возгорании титана в кислороде при различной скорости появления ювенильной поверхности металла // ИФЖ.— 1992.— 62, № 3.— С. 443—445.
6. Бепер Ж. Окисление металлов.— М.: Металлургия, 1968.— Т. 1.
7. Николаев С. А., Запихина Т. П. О загорании титана при повышенных давлениях кислорода // Цветные металлы.— 1964.— № 1.— С. 54—55.
8. Попов Б. Г., Веревкин В. Н., Бондарь В. А. и др. Статическое электричество в химической промышленности.— Л.: Химия, 1971.
9. Розловский А. И. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами.— М.: Химия, 1980.
10. Болобов В. И., Березин А. Ю., Дрожжин П. Ф. и др. Воспламенение компактных образцов нержавеющей стали в кислороде высокого давления // ФГВ.— 1985.— 27, № 3.— С. 3—7.

г. Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 18/VI 1992

УДК 541.182.45 + 614.841.12

В. В. Замашников, И. А. Какуткина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ГОРЕНИЯ ВОДОСНОВНЫХ ПЕН, ЗАПОЛНЕННЫХ ГОРЮЧИМИ ГАЗАМИ

Экспериментально исследованы скорости горения водосновных пен в зависимости от их кратности, дисперсности, типа и состава горючей газовой смеси, заполняющей пузырьки пены, состава жидкой фазы пены. Показано, что в общем случае скорость горения пен есть немонотонная функция кратности.

Пены представляют собой разновидность двухфазных газожидкостных систем. Горючей в пенах может быть газовая фаза, жидкая или обе вместе. Образование стабильных пен с горючей жидкой фазой затруднено из-за отсутствия поверхностно-активных веществ, сильно понижающих поверхностное натяжение органических жидкостей [1]. Водосновные пены с горючей газовой фазой достаточно стабильны и могут образовываться в различных технологических процессах. Поэтому необходимо знание горючих свойств таких пен.

© В. В. Замашников, И. А. Какуткина, 1993.