

13. Жижин Г.В., Ларина Т.И. Стоячие волны химических реакций в пористых инертных средах // ФГВ. — 1994. — 30, № 4. — С. 11—20.
14. Шкадинский К.В., Хайкин Б.И., Мержанов А.Г. Распространение пульсирующего фронта экзотермической реакции в конденсированной фазе // ФГВ. — 1971. — 7, № 1. — С. 19.
15. Канель Я.И. О стабилизации решения уравнений теории горения при финитных начальных функциях // Мат. сб. — 1964. — 65, № 3. — С. 398.
16. Алдушин А.П., Луговой В.Д., Мержанов А.Г., Хайкин Б.И. Условия вырождения стационарной волны горения // Докл. АН СССР. — 1978. — 243, № 6. — С. 1434.

193167, г. С.-Петербург,
АО "ЛЕННИИХИММАШ"

Поступила в редакцию
22/11 1994

УДК 536.46

Б.Г. Ефимов, П.Н. Кузьяев

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ МЕТАЛЛОВ В ПОТОКЕ $N_2 + O_2$

Экспериментально исследовано влияние скорости потока $N_2 + O_2$ и концентрации кислорода на скорость и характер горения образцов из титановых сплавов и Ст. 20. Получены зависимости предельной скорости потока, при которой еще существует самоподдерживающееся горение, от концентрации O_2 .

Горению компактных образцов металлов в покоящейся кислородной среде посвящена обширная литература [см. 1]. В то же время горение металлов в потоке кислорода или обогащенного кислородом воздуха исследовано недостаточно. В [2] скорость потока $N_2 + O_2$ $v = 0 \div 10$ м/с.

В настоящей работе изучены некоторые особенности горения конструкционных сплавов на основе Ti и Ст. 20 в диапазоне скоростей потока $N_2 + O_2$ от минимальной скорости $v_{пр}$ существования самоподдерживающегося горения до $v = 50$ м/с.

Эксперименты проводили с пластинами длиной 60, шириной 5 и толщиной 0,8—1,0 мм. Образцы располагали горизонтально, направления потока газа и распространения горения совпадали. Горение образцов, аналогично [3, 4], инициировали нагревом передней области образца до температуры плавления пучком непрерывного лазерного излучения. Смесь $N_2 + O_2$ с заданной концентрацией готовили заранее в баллонах и через редуктор и электромагнитный клапан подавали в форкамеру газодинамической установки. Поток газа в рабочей части установки создавался дозвуковым соплом с выходным сечением 30 × 20 мм. Температура торможения потока ≈ 290 К, статическое давление в рабочей части (камере Эйфеля) близко к атмосферному. Процесс горения образцов регистрировали кинокамерой с частотой съемки 8 кадр/с. Среднюю скорость горения определяли по времени распространения видимой зоны горения по образцу на заданное расстояние.

В [4] для ряда промышленных сплавов на основе титана экспериментально определены предельные скорости потока воздуха, ниже которых режим самоподдерживающегося горения не реализуется. Диапазон изменения предельной скорости составил от 12 (для сплава BT25Y) до 30 м/с (для сплава β_1).

В настоящей работе для ряда исследованных в [4] титановых сплавов ($\beta_1, \beta_2, OT4-1B$), а также для Ст. 20 получены зависимости предельной скорости потока газа $v_{пр}$ от концентрации кислорода x_O (рис. 1).

Ст. 20 в отличие от титановых сплавов в потоке воздуха не горит. Это связано, по-видимому, с более низким чем для титана тепловым эффектом реакции окисления железа. Поскольку при горении Ст. 20 скорость поступления кислорода в зону реакции контролируется диффузией O_2 через слой

© Б.Г. Ефимов, П.Н. Кузьяев, 1994.

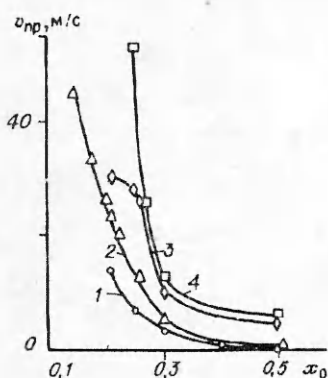


Рис. 1. Зависимость предельной скорости потока $N_2 + O_2$ от концентрации кислорода.
1 - сплав β_2 ; 2 - ОТ4-1В; 3 - β_1 ; 4 - Ст. 20.

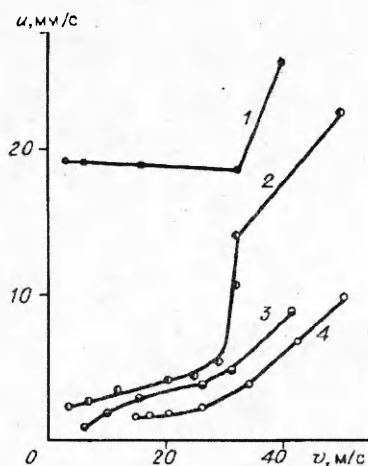


Рис. 2. Зависимость скорости горения сплава β_2 от скорости потока $N_2 + O_2$.
 x_O : 1 - 0,5; 2 - 0,3; 3 - 0,25; 4 - 0,21 (воздух).

частично окисленного расплава металла [2], достаточное для поддержания процесса горения энерговыделение может быть обеспечено только за счет повышения молярной концентрации O_2 в потоке газа и уменьшения толщины слоя расплава при увеличении скорости потока газа.

Действительно, в экспериментах при увеличении x_O от 0,21 (воздух) до 0,25 реализован режим самоподдерживающегося горения Ст. 20 при $v_{пр} = 53$ м/с. Если $v < 53$ м/с, сгорает лишь часть образца, далее движение фронта горения замедляется и горение прекращается. Увеличение x_O до 0,3 приводит к резкому падению значения $v_{пр}$, что свидетельствует об относительно слабом влиянии скорости потока на энергобаланс горения Ст. 20.

Зависимость $v_{пр}(x_O)$ для титанового сплава β_1 , скорость горения которого контролируется диффузией кислорода в слое частично окисленного расплава [4], аналогична таковой для Ст. 20, за исключением участка вблизи $x_O = 0,21$, где состав β_1 в отличие от Ст. 20 хорошо горит.

Для титановых сплавов ОТ4-1 и β_2 , горение которых лимитируется газофазной диффузией O_2 , если принять аналогично [2], что срыв горения происходит при некотором предельном постоянном значении теплового потока и, следовательно, при постоянном значении $u_{пр}$ величина $v_{пр}$ должна изменяться $\sim x_O^{-2}$. Однако такая зависимость $v_{пр}(x_O)$ наблюдается только для сплава ОТ4-1В в диапазоне $x_O = 0,15 \div 0,25$. Для сплава ОТ4-1В при $x_O > 0,25$ и сплава β_2 при $x_O = 0,21 \div 0,5$ $v_{пр}$ падает более резко с ростом x_O . По-видимому, это объясняется наблюдаемым в эксперименте существенным уменьшением размера капель (следовательно, и характерного размера d горящего образца) с увеличением x_O . При $x_O = 0,5$ пластины из сплавов β_2 и ОТ4-1В горят уже при отсутствии внешнего потока газа ($v_{пр} = 0$).

Скорость горения сложным образом зависит от скорости потока газа и концентрации кислорода, поскольку меняются лимитирующие горение процессы, а также характер образования и движения расплавленного металла и окислов в окрестности фронта горения.

На рис. 2 представлена скорость горения титанового сплава β_2 в зависимости от скорости потока газа. Отметим, что при $v \leq 30$ м/с сплав горит с периодическим образованием и уносом капель расплава металла и растворимых в металле окислов. В диапазоне $x_O = 0,21 \div 0,25$ капли вязкие, имеют неправильную форму, сильно вытянуты и достигают в момент отрыва от образца длину 10—12 мм (рис. 3, а). С увеличением скорости потока газа толщина пограничного слоя на поверхности капли уменьшается,

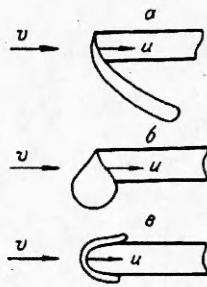


Рис. 3. Схема распространения горения по образцам из сплава β_2 .
 v , м/с: а, б — < 30 , в — > 30 ; x_{O_2} : а — $0,21 + 0,3$, б — $0,5$, в — $0,3 + 0,5$.

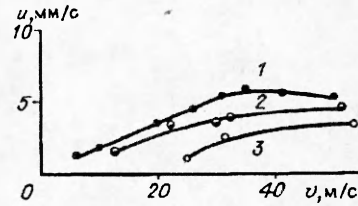


Рис. 4. Зависимость $u(v)$ для Ст. 20.
 x_{O_2} : 1 — $0,5$, 2 — $0,3$, 3 — $0,27$.

вследствие этого увеличивается скорость поступления кислорода к поверхности горения и соответственно скорость горения.

При увеличении x_{O_2} образуются менее вязкие капли расплава, более правильной формы и меньшего размера (вязкость расплава снижается, по-видимому, из-за роста температуры горения титана с увеличением концентрации кислорода [1]).

Для $x_{O_2} = 0,3$ в зависимости $u(v)$ наблюдается скачок скорости горения при $v = 30 \div 32$ м/с. Визуальные наблюдения за характером горения пластины показывают, что такой скачкообразный рост скорости обусловлен перестройкой течения расплава в зоне горения. Как уже отмечалось, при $v < 30$ м/с расплав стекает в виде капель, периодически отрывающихся от передней части пластины. С увеличением скорости потока капля под действием аэродинамической силы разворачивается по потоку, и при $v \approx 30$ м/с она почти прилегает к нижней поверхности образца. Однако при $x_{O_2} = 0,21 \div 0,25$ контакт длинных вязких капель с поверхностью плохой. Если $x_{O_2} = 0,3$, менее вязкий расплав с ростом v от 29 до 32 м/с начинает растекаться в виде тонкого слоя по верхней и нижней поверхностям пластины, обеспечивая дополнительный прогрев металла перед фронтом горения и, как результат этого, резкое увеличение скорости горения.

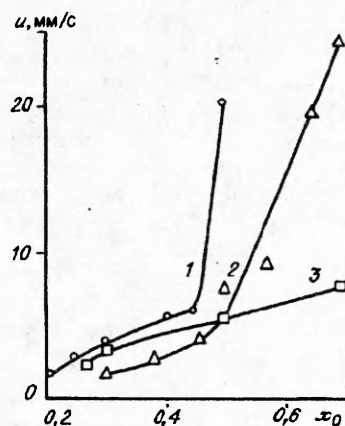
При $v < 30$ м/с и $x_{O_2} = 0,5$ горение образцов из сплава β_2 сопровождается образованием небольших круглых капель расплава, быстро сносимых потоком газа (рис. 3, б). Скорость выделения тепла на поверхности горячей капли столь значительна, что лимитирующим процессом становится скорость передачи тепла от горячей капли к металлу образца, поэтому в левой части зависимости $u(v)$ для $x_{O_2} = 0,5$ скорость горения с увеличением скорости потока газа не возрастает, и наоборот, из-за повышения конвективных теплопотерь u несколько снижается с увеличением v .

В области $v > 30$ м/с вместо капель на нижней и верхней поверхностях образуются наплывы расплава (рис. 3, в), поперечный размер которых меньше размера капель, т.е. при $v \approx 30$ м/с скачкообразно изменяется характерный размер d горящего образца, поэтому экспериментальные зависимости $u(v)$ фиксирующие также изменение скорости горения за счет уменьшения d , становятся при $v > 30$ м/с более крутыми.

На рис. 4 представлены зависимости $u(v)$ для Ст. 20, отличающиеся от аналогичных зависимостей для сплава β_2 существенно меньшими величинами u при $v > 30$ м/с. Такой характер изменения $u(v)$, как показано в [4] при анализе процесса горения сплавов ВТ23 и β_1 в воздухе, возможен, если скорость окисления металла контролируется диффузией кислорода в слое частично окисленного расплава.

На рис. 5 показаны зависимости скорости горения металлических образцов от молярного содержания кислорода в смеси при фиксированных скоростях потока. При $v = 31$ м/с скорость горения Ст. 20 практически линейно возрастает с увеличением x_{O_2} и при $x_{O_2} = 0,7$ достигает 7,6 мм/с. Сплавы на

Рис. 5. Зависимость скорости горения в потоке $N_2 + O_2$ от концентрации кислорода.
1 — сплав β_2 ; 2 — ОТ4-1В; 3 — Ст. 20.



основе титана ОТ4-1В и β_2 в области $v < 30$ м/с характеризуются более сложным видом зависимостей $u(x_0)$: начиная с $x_0 = 0,45$ темп роста u с повышением x_0 резко возрастает.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы. В потоке $N_2 + O_2$ с $x_0 = 0,25$ при $v \geq 53$ м/с реализуется режим самоподдерживающегося горения Ст. 20. С увеличением x_0 до 0,3 предельные скорости потока газа для всех сплавов резко снижаются.

В области $v < 30$ м/с, $x_0 < 0,45$ скорости горения всех сплавов не превышает 6 мм/с, при $x_0 > 0,45$ с ростом x_0 скорость горения сплавов β_2 и ОТ4-1В резко увеличивается.

Процесс горения титановых сплавов, в отличие от горения Ст. 20, сильно интенсифицируется с повышением скорости потока $N_2 + O_2$ в области $v > 30$ м/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маркштейн Г.Х. Горение металлов // РТК. — 1963. — 1, № 3. — С. 3.
2. Иванов Б.А. Безопасность применения материалов в контакте с кислородом. — М.: Химия, 1984.
3. Ефимов Б.Г., Клюкин С.С., Кувяев П.Н. и др. Влияние потока воздуха на горение титановых пластин // ФГВ. — 1989. — 25, № 2. — С. 29.
4. Борисова Е.А., Берникова Н.Г., Ефимов Б.Г. др. Влияние состава титановых сплавов на характер горения в потоке воздуха // ФГВ. — 1991. — 27, № 3. — С. 35.

140160, г. Жуковский, ЦАГИ

Поступила в редакцию 11/1 1994,
после доработки — 25/IV 1994

УДК 536.46

Л.Я. Кашпоров, Ю.Е. Шелудяк, В.В. Ухов

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

В рамках энтальпийного подхода проведен анализ экспериментальных данных о скорости горения различных систем на основе алюминия. Определены тепловые параметры волны горения этих смесей и установлено, что температура их воспламенения в волне стационарного горения близка к температуре плавления алюминия.

В рамках энтальпийного подхода [1—7] скорость стационарного горения определяется уравнением

$$u\rho = \frac{q_m}{h_m - h(T_n)}, \quad (1)$$

где u — линейная скорость горения; ρ — плотность; h — энтальпия; T_n — начальная температура; q_m и h_m — тепловой поток и максимальная энтальпия в критическом сечении волны горения. Параметр q_m характеризует внешнее тепловое воздействие на горящий образец и зависит от тепловыде-