

УДК 536.46

ВЛИЯНИЕ УГЛА АТАКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ
ГОРЕНИЯ ТИТАНОВЫХ ПЛАСТИН В ПОТОКЕ ВОЗДУХА

Б. Г. Ефимов, П. Н. Кузьев

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского,
140160 Жуковский

Экспериментально исследовано влияние угла атаки в диапазоне от нуля до 20° на предельную скорость потока воздуха и скорость горения узких пластин из промышленных титановых сплавов.

Известно, что предельные характеристики горения металлов могут существенно зависеть от ориентации образца. В [1], например, приведены экспериментальные данные о предельном давлении кислорода для образцов, горящих в кислороде при отсутствии потока, ориентированных горизонтально либо вертикально. Значения предельного давления для стали ОН9А и медистого чугуна остаются практически неизменными при изменении ориентации, а для сталей Х18Н9Т и ЗХ13 изменяются в десятки раз, причем наименьшие значения предельного давления кислорода во всех случаях наблюдаются при горизонтальном расположении образца.

Практически отсутствуют литературные данные о влиянии ориентации на характеристики горения в потоке окислителя. Можно назвать лишь работу [2], в которой сообщается о существенном влиянии угла ориентации образца на процесс образования жидкой капли при горении сплава железа с никелем в потоке кислорода.

Цель настоящего исследования — установление зависимостей скорости горения и предельной скорости потока от величины угла атаки α (угла между горящим образцом и направлением потока воздуха) для ряда промышленных титановых сплавов.

Эксперименты, как и в [3], проводились с пластинами длиной 60, шириной 5 и толщиной 0,8–1,0 мм, устанавливаемыми под углом от нуля до 20° к направлению потока воздуха. Горение инициировалось нагревом передней области образца размером 5 мм непрерывным излучением электролазерного CO_2 -лазера до температуры плавления. Поток воздуха создавался дозвуковым соплом с выходным сечением 30×20 мм. Температура торможения потока составляла ~ 290 К, статическое давление в рабочей части близко к атмосферному. Скорость воздушного потока изменялась с помощью дросселя в диапазоне $10 \div 200$ м/с и определялась по отношению давлений в форкамере и на выходе сопла, измеряемых с помощью комплексов ИКД. Процесс горения пластин регистрировался кинокамерой с частотой съемки 8 кадр/с. Средняя скорость горения определялась по времени сгорания рабочего участка пластины длиной 50 мм.

На рис. 1 приведены зависимости скорости горения u от скорости потока воздуха v . При $v < 30$ м/с, когда горение сплава β_2 сопровождается периодическим образованием и отрывом капель расплава, значение u не зависит от α . Скорость горения пластин из сплава ОТ4-1В в том же диапазоне v при $\alpha > 0$ больше, чем расположенных горизонтально (в ~ 2 раза при $v = 25$ м/с и $\alpha = 20^\circ$). При $v > 40$ м/с наклонные пластины из всех сплавов горят значительно медленнее, чем горизонтальные.

На рис. 2 представлены значения предельной скорости потока воздуха v_* . Для сплавов ВТ25, ВТ18, β_2 величина v_* практически неизменна в диапазоне $\alpha = 0 \div 20^\circ$, а для сплава ОТ4-1В v_* уменьшается с увеличением

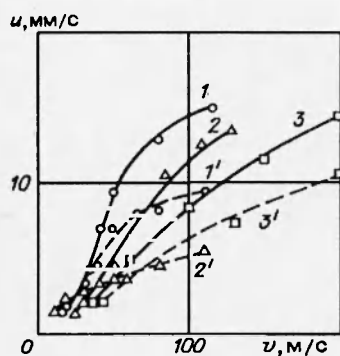


Рис. 1. Зависимости скорости горения от скорости потока воздуха. 1, 1' — сплав β_2 ; 2, 2' — ОТ4-1В; 3, 3' — ВТ6; α , град: 1-3 — 0, 1', 2' — 20, 3' — 10.

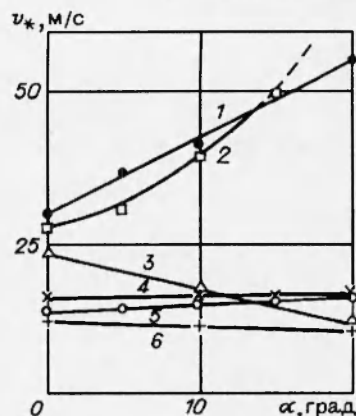


Рис. 2. Зависимости предельной скорости потока воздуха от угла α . 1 — ВТ6; 2 — ВТ23; 3 — ОТ4-1В; 4 — ВТ18; 5 — β_2 ; 6 — ВТ25.

α и при $\alpha = 20^\circ$ в ~ 2 раза ниже, чем при $\alpha = 0$. Самоподдерживающееся горение пластин из сплавов ВТ6 и ВТ23, расположенных под углом атаки, реализуется при более высоких скоростях потока. В случае $\alpha = 20^\circ$ режим самоподдерживающегося горения пластин из ВТ23 осуществить не удалось, хотя скорость потока была увеличена до 200 м/с.

Столь разный характер зависимостей $v_*(\alpha)$ для исследованных сплавов обусловлен как различием физических свойств (главным образом, вязкости) расплавов, так и различием процессов, контролирующих горение сплавов. Наибольшую вязкость имеют расплавы ВТ18, ВТ25 и β_2 , в состав которых входят добавки молибдена от 0,5 до 10 %, меньшая вязкость характерна для расплавов ОТ4-1В, ВТ6 и ВТ23, содержащих от 1,5 до 5 % ванадия [3].

По механизму горения сплавы можно разделить на две группы. В первую входят ВТ18, ВТ25, β_2 и ОТ4-1В, горящие при скоростях потока от v_* до 150 м/с в режиме ограничения скорости горения диффузией кислорода через пограничный слой воздуха толщиной δ ($u \sim 1/\delta$), во вторую — сплавы ВТ6 и ВТ23, скорость горения которых контролируется диффузией кислорода в слое частично окисленного расплава толщиной Δ ($u \sim 1/\Delta$).

С учетом сказанного характер зависимостей $v_*(\alpha)$ для сплавов ВТ18, ВТ25 и β_2 можно трактовать следующим образом. Поскольку эти сплавы в критических режимах (при $\alpha \geq 0$) горят с образованием вязких капель расплава, длина которых на порядок превышает толщину h образца, характерным размером l в направлении обтекания торца горячей пластины потоком воздуха является полуширина пластины $b/2$ ($1/2$ поперечного размера капли, не меняющегося при изменении α (рис. 3,а)). Вследствие этого предельная скорость потока, пропорциональная при ламинарном режиме обтекания характерному размеру образца, также не зависит от α .

Устойчивое горение горизонтально ориентированных пластин из сплава ОТ4-1В возникает при $v \geq 24$ м/с, когда образующиеся капли менее вязкого расплава частично прилегают к нижней поверхности пластины. При горении пластин, установленных под углом атаки, достаточно хороший контакт капель с нижней поверхностью обеспечивается за счет их благоприятного взаимного расположения при минимальном воздействии потока (см. рис. 3,б), поэтому v_* резко снижается до 12 м/с при $\alpha = 20^\circ$. С

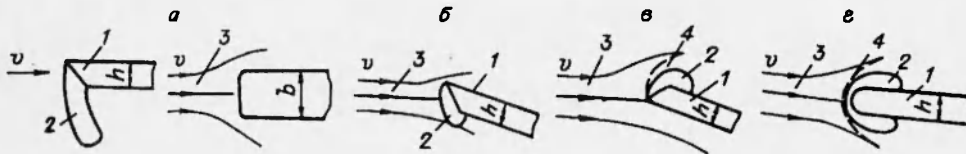


Рис. 3. Схемы горения титановых пластин в потоке воздуха.

1 — пластина; 2 — расплав; 3 — поток воздуха; 4 — пограничный слой.

увеличением v вследствие асимметрии обтекания пластин потоком воздуха (передняя критическая точка с увеличением α перемещается с центра торца к нижней поверхности пластины) расплав обтекает торец пластины снизу вверх, образуя на верхней поверхности наплыв (см. рис. 3, в). Характерный размер обтекания в случае $\alpha \approx 10 \div 20^\circ$ уменьшается до величины порядка толщины пластины, и скорость горения наклонных пластин больше, чем при $\alpha = 0$ (в ламинарном режиме $u \sim 1/\sqrt{l}$).

В режиме $v > 40$ м/с и $\alpha = 0$ расплав симметрично обтекает торец пластины в двух направлениях и далее течет по верхней и нижней поверхности пластины (см. рис. 3, г). Обтекание пластины потоком воздуха также симметричное, и характерный размер в этом случае $l \sim h/2$, т. е. меньше, чем при $\alpha > 0$. Вследствие этого скорость горения горизонтальных пластин из сплавов ВТ18, ВТ25, ОТ4-1В и β_2 выше, чем наклонных.

Для сплавов ВТ6 и ВТ23, скорость горения которых контролируется диффузией кислорода через слой расплавленного металла и окислов, как уже отмечалось, $u \sim 1/\Delta$. Покажем, что с увеличением α значение Δ растет, и, следовательно, u уменьшается, а v_* увеличивается.

Обозначим параметры горения при $\alpha = 0$ индексом 0, а при $\alpha > 0$, таким, что торец пластины обтекается расплавом только в одном направлении снизу вверх ($\alpha \approx 10 \div 20^\circ$), индексом α . Тогда

$$u_0/u_\alpha = \Delta_\alpha/\Delta_0. \quad (1)$$

Из уравнений неразрывности для расплава

$$\begin{aligned} V_0\Delta_0 &= u_0h, \\ 0,5 V_\alpha\Delta_\alpha &= u_\alpha h, \end{aligned} \quad (2)$$

где V — скорость движения внешней границы расплава, получаем

$$u_0/u_\alpha = 2 V_0\Delta_\alpha/V_\alpha\Delta_\alpha. \quad (3)$$

Приравняв правые части (1) и (3), имеем

$$2 V_0/V_\alpha = \left(\frac{\Delta_\alpha}{\Delta_0}\right)^2. \quad (4)$$

Из уравнений баланса сил, действующих на расплав [3], при фиксированной скорости потока воздуха получаем

$$2 V_\alpha/V_0 = \left(\frac{\Delta_\alpha}{\Delta_0}\right)^2. \quad (5)$$

Из (4) и (5) следует, что $V_0 = V_\alpha$, и тогда, согласно (3),

$$u_0/u_\alpha = 2 \Delta_0/\Delta_\alpha. \quad (6)$$

Сравнивая (1) и (6), получаем $\Delta_\alpha/\Delta_0 = \sqrt{2}$, и, следовательно, $u_0/u_\alpha \approx 1,4$.

Из уравнений баланса сил

$$v_{*\alpha}/v_{*0} = \sqrt{2} \sqrt{V_\alpha}/\sqrt{V_0} \cdot \Delta_0/\Delta_\alpha. \quad (7)$$

Но на предельных режимах $u_{*0} = u_{*\alpha}$ [1], поэтому $\Delta_0/\Delta_\alpha = 1$. Тогда из (3) $V_\alpha/V_0 = 2$ и $v_{*\alpha}/v_{*0} = 2$.

Таким образом, согласно оценкам, при увеличении α от нуля до 10–20° скорость горения сплавов ВТ6 и ВТ-23 уменьшается в $\sim 1,4$ раза, а предельная скорость потока увеличивается в ~ 2 раза, что качественно согласуется с результатами экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Б. А. Безопасность применения материалов в контакте с кислородом. М.: Химия, 1984.
2. Иванов Б. А., Наркунский С. Е., Ульянова Н. И. и др. Макрокинетика процессов горения металлов вблизи предельных давлений горения / Тез. докл. I Всесоюз. симп. по макроскопической кинетике и химической газодинамике. Черногловка. 1984. Т. 1, ч. 2. С. 67.
3. Борисова Е. А., Берникова Н. Г., Ефимов Б. Г. и др. Влияние состава титановых сплавов на характер горения в потоке воздуха // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 3. С. 35–40.

Поступила в редакцию 28/VII 1994 г.
