

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 662.216.5

ТЕМПЕРАТУРА ГОРЕНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

Б. М. Злобинский, В. Г. Иоффе, Х. И. Пейрик,  
Е. И. Попов  
(Москва)

Температура, развивающаяся при горении аэрозолей высокоактивных металлов и сплавов, зависит от соотношения между скоростями генерации и отвода тепла, что связано с химическим и дисперсным составом применяемых порошков, а также некоторыми другими их характеристиками и условиями горения.

Изучалось влияние химического состава металлических сплавов Zr—Ti, Zr—Si, Ni—Al, Ni—Ti на температуру горения аэрозолей.

Сплавы получены двойным переплавом в атмосфере Ar в дуговой печи с неработающим  $\omega$ -электродом. Полученные слитки очищались травлением от поверхностных загрязнений, превращались в стружку и размальвались с последующим выделением фракции <50 мкм. Порошки вязких сплавов Zr—Ti получались гибридным способом. Измельчение сплавов Zr—Ti и Zr—Si производилось на воздухе, а Ni—Al и Ni—Ti— в защитной атмосфере этилового спирта с последующим хранением в Ar.

Эксперименты проводились на усовершенствованной установке с импульсным пневматическим распылением навески порошка в сферической стеклянной взрывной камере с электроникровым воспламенением [1]. Температура измерялась фотоэлектрическим пирометром с механической обтюрацией светового потока и осциллографической записью. При частоте обтюрации 2,2 кгц пирометр позволяет измерять температуру, изменяющуюся со скоростью до  $5 \cdot 10^4$  град/сек. Пирометр градуировался стандартным способом по температурной лампе. Благодаря остроугольной оптической системе пирометр измерял температуру участка пламени диаметром 1 мм.

Измеренная фотоэлектрическим пирометром температура является яркостной ( $T_{я}$ ) и отличается от истинной ( $T_{и}$ ) по известному уравнению

$$\frac{1}{T_{я}} - \frac{1}{T_{и}} = \frac{\lambda}{c_2} \ln \frac{1}{\epsilon_{\lambda, T}}$$

где  $\lambda$  — эффективная длина волны воспринимаемого пирометром излучения;  $\epsilon_{\lambda, T}$  — монохроматическая степень черноты излучателя при данных значениях  $\lambda$  и  $T$ ;  $c_2 = 1,438 \cdot 10^{-2}$  м · град — постоянная в формуле Планка, описывающей распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела. Из-за отсутствия точных данных о значении  $\epsilon_{\lambda, T}$  для пылеметаллических пламен нельзя определить методическую ошибку измерения температуры по формуле (1). Анализ данных работы [2] позволяет предположить, что  $\epsilon_{\lambda, T}$  находится в интервале от 0,5 до 0,7. Тогда при  $T_{и} = 2000^\circ \text{K}$  разность  $T_{и} - T_{я}$  не должна превышать  $100^\circ$ .

Объекты измерения температуры в настоящей работе близки между собой по своей природе, и поэтому методическая ошибка мало изменяется от опыта к опыту и не может существенно исказить характер исследуемых зависимостей. При изложении результатов экспериментов указываются яркостные температуры.

На рис. 1 представлена одна из осциллограмм температуры, а полученные зависимости температуры горения от состава сплава изображены на рис. 2.

При изменении концентрации аэрозоля в пределах от 40 до 320 г/м<sup>3</sup> оказалось, что колебания температуры горения не превышают погрешности измерения и не носят систематического характера. При повторении одинаковых опытов осциллограммы и

максимальные значения температуры весьма расходятся между собой. Кривые на рис. 2 построены по наибольшим результатам из ряда (не менее 10) одинаковых опытов.

Исследуемые сплавы и их окислы нелетучи при наблюдавшихся температурах, газовая фаза состоит из прозрачных при эффективной длине волны пирометра газов  $N_2$  и  $O_2$  и единственным источником излучения являются горящие частицы, температуру которых и измеряет пирометр.

Температура отдельной частицы за время горения возрастает до максимума и снова падает. Длительность этого процесса зависит от размеров частицы. Неправильная угловая форма частиц и неоднородности их свойств и термодинамических условий вызывают различия в температуре и давлении газов с разных сторон частицы, что приводит к хаотическому движению частиц в пламени. Поэтому в поле зрения пирометра диаметром в 1 мм попадают частицы, находящиеся на разных стадиях горения с разной температурой, и не в каждом опыте удается «поймать» частицы, достигшие максимальной температуры. Этим же можно объяснить и зубчатый характер полученных осциллограмм.

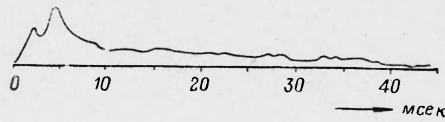


Рис. 1. Осциллограмма температуры горения аэрозоля сплава  $Zr+24\% Ti$ . Концентрация аэрозоля  $c=156 \text{ г/м}^3$ , максимальное значение температуры —  $1750^\circ C$ .

Независимость температуры горения от концентрации аэрозоля в исследованном диапазоне может быть объяснена на основе поверхностного механизма горения при значительном избытке  $O_2$  в газовой фазе. В этом случае скорость горения и генерации тепла не зависит от концентрации аэрозоля. Скорость отвода тепла в области малых концентраций аэрозоля с прозрачной газовой фазой также не зависит от концентрации. Поэтому и температура горения не зависит от концентрации аэрозоля.

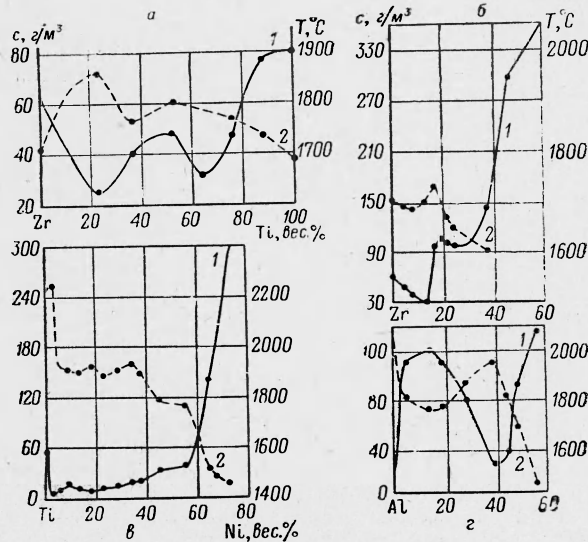


Рис. 2. Зависимость температуры горения (1) и нижнего концентрационного предела воспламенения (2) от состава сплава для систем двойных сплавов:  $Zr-Ti$  (а),  $Zr-Si$  (б),  $Ni-Ti$  (в),  $Ni-Al$  (г) ( $c$  — концентрация аэрозоля).

Способность металла к достижению высоких температур горения можно было бы оценить по величине отношения теплоты образования к теплоемкости окисла. Оно примерно одинаково ( $13 \cdot 10^3 - 15 \cdot 10^3 \text{ град}$ ) для компонентов исследованных сплавов, кроме  $Ni$  ( $4,5 \cdot 10^3 \text{ град}$ ). Исходя из этого, следовало ожидать, что зависимость температуры горения от состава сплава должна описываться прямой линией почти горизонтальной ( $Ni-Ti$ ,  $Ni-Al$ ) или наклонной, так как тепловые эффекты взаимодействия между компонентами сплава пренебрежимо малы по сравнению с теплотой окисления. В действительности эта зависимость резко отличается от прямолинейной.

Отсюда можно заключить, что определяющее влияние на температуру горения оказывает не отношение теплоты образования к теплоемкости окисла, а скорость горения. Рост последней уменьшает отвод тепла от горящих частиц и повышает их температуру.

На рис. 2 изображены также зависимости нижнего концентрационного предела воспламенения [4] от состава сплава, который, как известно, тем ниже, чем выше химическая активность сплава, и может служить мерой этой активности. Сопоставление кривых на рис. 2 показывает, что повышение температуры, а значит и скорости горения связано с понижением предела воспламенения, т. е. с повышением химической активности сплава. Осциллограммы и кинограммы горения также показывают, что процесс горения высокоактивных сплавов, развивающих более высокие температуры, протекает быстрее.

После этого становится понятным расхождение значений температуры горения и предела воспламенения чистого  $Ti$  на рис. 2, а, в. В первом случае условия измельчения и хранения порошка привели к большей пассивации окисной пленкой, чем во втором.

Указанная связь между температурой горения и химической активностью сплава нарушается для тугоплавких ( $2200-2250^\circ C$ ) силицидов, образующихся в сплавах  $Zr-Si$  с содержанием от 14 до 21% (массовых) [5]. Температура горения аэрозолей этих сплавов повышается, несмотря на понижение активности, обнаруживаемое по повышению предела воспламенения. Такое отклонение объясняется тем, что горение  $Zr$  происходит на поверхности жидкой металлической фазы [6], поэтому резкое повышение температуры плавления приводит к повышению температуры горения даже при снижении химической активности сплава.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

Температура горения аэрозолей сплавов  $Zr-Ti$ ,  $Zr-Si$ ,  $Ni-Al$ ,  $Ni-Ti$  не зависит от концентрации аэрозоля в области малых концентраций и определяется не столько отношением теплоты образования к теплоемкости окислов, сколько химической активностью порошков, зависящей от состава сплава и других характеристик порошка.

Для тугоплавких силицидов циркония повышение температуры плавления приводит к повышению температуры горения, несмотря на понижение химической активности.

Результаты экспериментов находят объяснение при предположении поверхностного механизма горения.

Поступила в редакцию  
12/VIII 1968

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. В. Мануев. Изв. вузов, Черная металлургия, 1962, 9.
2. А. К. Кадышев и ч. Измерение температуры пламени. М., Металлургиздат, 1961.
3. Краткий справочник физико-химических величин. Под ред. К. П. Мищенко и А. А. Равделя. М., «Химия», 1965.
4. В. Г. Иоффе. ФГВ, 1966, 2, 1.
5. Металлургия циркония. Пер. с англ. Под ред. Г. А. Меерсона и Ю. В. Гагаринского. ИЛ, 1959.
6. В. Г. Иоффе. Изв. вузов, Цветная металлургия, 1964, 3, 6.

УДК 662.215.1

#### К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ВЛИЯНИЯ ИНГИБИТОРОВ НА ГОРЕНИЕ АММИАЧНО-СЕЛИТРИАНЫХ СМЕСЕЙ

А. П. Глазкова, О. К. Андреев  
(Москва)

Замедлить химические реакции, протекающие при горении аммиачной селитры и ее смесей, можно двумя путями [1]. Один из них заключается в том, что добавление веществ, легко распадающихся при горении с выделением аммиака, будет приводить к смещению реакции диссоциации нитрата аммония влево и к снижению, таким образом, скорости горения; второй — вещества с восстановительными свойствами, добавленные к нитрату аммония, связывая азотную кислоту или окислы азота, образующиеся в результате распада последней, будут тормозить дальнейшее окисление аммиака, что так же может приводить к уменьшению скорости горения.