

б) В опытах с предварительно нанесенными карбидными пленками при расплавлении металла происходит растворение пленки. Это свидетельствует о том, что скорость растворения пленки больше скорости ее образования вследствие реакционной диффузии (по крайней мере на начальных стадиях процесса). Аналогичный вывод сделан в работе [4] при изучении взаимодействия жидкого титана с графитовым тиглем.

Таким образом, на основе проведенных исследований может быть предложен следующий механизм воспламенения и горения нитей Ti и Zr в окружении слоя сажи. Нить нагревается электрическим током до температуры плавления металла как химически инертное тело. После расплавления жидкий металл под действием капиллярных эффектов устремляется в поры сажевого покрытия, что, с одной стороны, приводит к образованию полостей, а с другой,— к увеличению поверхности контакта между реагентами, вследствие чего становится возможным самораспространяющийся режим быстрой реакции. Химическое тепловыделение в этом случае обусловлено, главным образом, растворением углерода в жидком металле. Карбидные фазы образуются при кристаллизации раствора, что согласуется с представлениями, развиваемыми в [8] о механизме синтеза тугоплавких соединений в режиме горения через стадию образования насыщенных или перенасыщенных растворов на базе металла (твердых или жидких) с последующим выделением фазы продукта.

Отделение ИХФ АН СССР,  
Черноголовка

Поступила в редакцию  
4/XI 1975

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Мержанов, И. П. Боровинская. Докл. АН СССР, 1972, 204, 2, 366.
2. Л. Б. Машкин, И. М. Горяинов и др. ПТЭ, 1971, 2, 176.
3. С. Л. Харатьян, Ю. М. Григорьев, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1975, 11, 1, 26.
4. Елютин, М. А. Маурах.— В сб.: Высокотемпературные материалы. М., «Металлургия», 1968.
5. Тугоплавкие материалы в машиностроении. Справочник. Под ред. А. Т. Туманова, К. И. Портного. М., «Машиностроение», 1967.
6. В. С. Дергунова, Ю. В. Левинский и др. Взаимодействие углерода с тугоплавкими металлами. М., «Металлургия», 1974.
7. С. С. Кутателадзе, В. М. Боришанский. Справочник по теплоотдаче. М.—Л., ГЭИ, 1959.
8. И. П. Боровинская.— В сб.: Горение и взрыв. Т. II. М., «Наука», 1975.

#### К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОКИСЛЕНИЯ МАГНИЯ

*В. Н. Блошенко, А. Г. Мержанов, Б. И. Хайкин*

В работах [1—4] предпринята попытка определить кинетические параметры окисления магния в воздухе из опытов по воспламенению одиночных частиц. Диапазон исследованных размеров частиц, соответствующие температуры воспламенения, модель воспламенения, на основе которой проводилась обработка экспериментальных данных, и полученные значения энергии активации  $E$  приведены в таблице. Зависимость критической температуры воспламенения  $T_{0кр}$  от диаметра частиц, измеренная авторами [1, 2, 4], представлена на рис. 1 (сплош-

Работа	Диаметр частиц, мкм	$T_{0\text{кр}}, \text{K}$	Схема расчета кинетических параметров (физическая модель)	$E$ , ккал/моль
[1]	15–55	1050–920	По теории гетерогенного воспламенения [5, 6]	18
[2]	20–120	1015–920	По теории гетерогенного воспламенения с учетом зависимости коэффициента теплопроводности газа от температуры	38
[3]	Использовались данные [1]		По теории гетерогенного воспламенения с учетом теплотеря на испарение металла	48
[4]	650–1560	906–896	По теории гетерогенного воспламенения с учетом теплотеря на испарение металла и излучение	143

ная кривая). Цель настоящей работы — анализ одной из возможных причин сильного различия полученных в [1–4] значений энергии активации.

Предварительно отметим следующее. Согласно общим представлениям теории теплового самовоспламенения [5], учет сравнительно слабой (степенной) зависимости коэффициента теплопроводности газа от температуры не может привести к столь сильному различию в значениях  $E$ , которое получено в [1, 2]. Возможность описания воспламенения частиц Mg на основе модели [3] нельзя считать доказанной, так как выполнение ряда допущений, положенных в основу этой модели, применительно к воспламенению частиц Mg нуждается в экспериментальной проверке [6]. Такие опыты до настоящего времени не проведены.

Учитывая сказанное, обработку экспериментальных данных [1, 2, 4] будем проводить по простейшей схеме, предполагающей, в соответствии с литературными данными [7], что Mg окисляется по линейному закону. Другими словами, будем предполагать, что связь между параметрами в критических условиях, согласно [6], определяется соотношениями Н. Н. Семенова, Д. А. Франк-Каменецкого [5, 8] (без учета теплотеря на излучение)<sup>1</sup>, т. е. в соответствии с теорией гетерогенного воспламенения

$$Q\rho \frac{E}{R\lambda} K C_{\infty}^{n_1} \frac{d_0}{\text{Nu} T_{0\text{кр}}^2} e^{-\frac{E}{RT_{0\text{кр}}}} \approx \frac{1}{e}, \quad (1)$$

где  $T_{0\text{кр}}$  — критическая температура воспламенения;  $d_0$  — диаметр частицы;  $\text{Nu}$  — число Нуссельта;  $E$  — энергия активации;  $K$  — предэкспонент;  $C_{\infty}$  — концентрация окислителя в ядре потока;  $\rho$  — плотность металла;  $Q$  — тепловой эффект реакции на грамм окисла, умноженный на отношение плотностей окисла и металла;  $R$  — газовая постоянная.

Если же в результате дальнейших экспериментальных исследований окажется, что для Mg применима модель [3], то найденные по этой простейшей

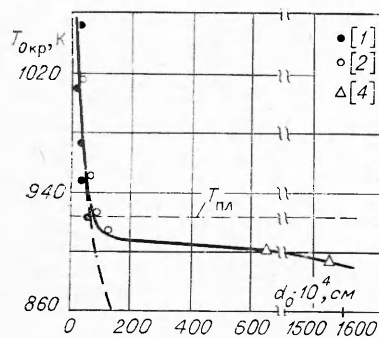


Рис. 1. Зависимость  $T_{0\text{кр}}(d_0)$ , построенная по данным [1, 2, 4] (сплошная линия) и рассчитанная по (1) (штриховая).

<sup>1</sup> Учет теплотеря на излучение будет проведен ниже.

схеме кинетические константы нужно будет рассматривать как эффективные, учитывающие влияние испарения Mg по [3].

Обратимся к рис. 1. Горизонтальная штриховая линия соответствует температуре плавления Mg ( $T_{пл} \approx 923$  К). Штриховая кривая построена по уравнению (1) (использованные при построении значения  $E$  и  $QpKC_{\infty}^m$  см ниже). Из рисунка видно, что до горизонтальной линии экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретической зависимостью (1). Для частиц, температура воспламенения которых меньше  $T_{пл}$  магния, наблюдается резкое отклонение экспериментальных данных от теоретической зависимости (1)<sup>2</sup>.

Резкое отклонение экспериментальных данных от теоретической зависимости (1), т. е. резкое изменение характера экспериментальной зависимости  $T_{0кр}(d_0)$ , имеющее место вблизи температуры плавления Mg, свидетельствует о существенной роли фазового перехода (плавления металла) в процессе воспламенения. В самом деле, для группы точек, расположенных ниже линии  $T = T_{пл}$ ,  $T_{0кр}$  (температура газа) не очень сильно отличается от температуры плавления магния ( $T_{пл} - T_{0кр} \leq 30^\circ$ ). Поскольку в момент срыва теплового равновесия температура частицы  $T_{кр}$  превышает  $T_{0кр}$  на один характеристический интервал  $RT_{0кр}^2/E$  (без учета теплотеря на излучение), то легко оценить, что для обычно встречающихся значений  $E$  температура частицы в момент срыва теплового равновесия ( $T_{кр} = T_{0кр} + RT_{0кр}^2/E$ ) может оказаться больше  $T_{пл}$ . Таким образом, при  $T_{0кр} < T_{пл}$  частицы в процессе разогрева за счет химической реакции могли плавиться: при  $T_{0кр} < T < T_{пл}$  частица твердая, а в интервале  $T_{пл} \leq T \leq T_{кр}$  — жидкая. Скорость окисления твердой и жидкой поверхности в общем случае различна. В процессе разогрева частицы за счет химической реакции по достижении температуры плавления металла может изменяться кинетический закон окисления металла, а, следовательно, и скорость тепловыделения.

Проанализируем критические условия воспламенения частиц металлов, окисляющихся по линейному закону. Рассмотрим случай, когда функция тепловыделения Mg, входящая в уравнение теплового баланса

$$1/6 \cdot c_p d_0 dT/dt = g - \alpha(T - T_0), \quad (2)$$

которое определяет критические условия воспламенения частиц металлов, окисляющихся по линейному закону [7], при достижении температуры плавления металла изменяется скачкообразно, т. е. имеет вид

$$g = \begin{cases} g_1 = Q_1 \rho_1 K_1 (C_{\infty}^m)_1 e^{-E_1/RT} & \text{при } T > T_{пл} \\ g_2 = Q_2 \rho_2 K_2 (C_{\infty}^m)_2 e^{-E_2/RT} & \text{при } T < T_{пл}. \end{cases} \quad (3)$$

При  $T = T_{пл}$  имеется скачок функции тепловыделения, связанный с изменением кинетики окисления. Положим также, что  $g_1(T_{пл}) \gg g_2(T_{пл})$ <sup>3</sup>. В (2), (3) приняты те же обозначения, что и в выражении (1); дополнительно обозначены:  $T$  — температура частицы;  $c$  — теплоемкость металла;  $T_0$  — температура газа;  $\alpha = \lambda Nu/d_0$  — коэффициент теплообмена.

<sup>2</sup> Для точек, взятых из работ [1, 2], теплотеря на излучение, согласно [6, 9] несущественны, поскольку параметр  $K_R$ , определяющий величину теплотеря излучением, мал:  $K_R \ll 1$ . Для точек, взятых из работы [4], учет радиационной составляющей теплообмена также не приводит к заметному изменению вида зависимости, показанного на рис. 1. Отметим далее, что влияние теплотеря на испарение металла в области  $T_{0кр} < T_{пл}$  заведомо несущественно (параметр  $K_v$ , введенный в [6] и определяющий степень влияния теплотеря на испарение металла, очень мал —  $K_v \ll 1$ ).

<sup>3</sup> В общем случае величина скачка функции тепловыделения может быть любой. Эти случаи в данной работе не рассматриваются.



Рис. 2. Диаграмма Н. Н. Семенова для функции тепловыделения (3) (а) и вид зависимости  $T_{0кр}(d_0)$  для областей 1, 2, 3 (б).

Рассмотрим диаграмму Н. Н. Семенова для функции тепловыделения (3), которая показана на рис. 2, а. На этой диаграмме прямая теплоотвода I характеризуется тем, что она проходит через точку излома и одновременно является касательной к функции тепловыделения  $g_1$ . Прямая теплоотвода II — касательная к функции тепловыделения  $g_2$  в точке  $T = T_{пл}$ . Из рис. 2, а можно сделать следующие выводы. Если угол наклона прямой скорости теплоотвода больше, чем угол наклона прямой I (угол наклона тем больше, чем меньше размер частицы) или, что то же самое,  $T_{0кр} > T_{о1}$ , то критические условия воспламенения будут определяться из условия касания прямой теплоотвода к функции тепловыделения  $g_1$ , т. е. кинетикой окисления жидкого Mg. В этом случае в уравнение (2) необходимо подставлять  $g = g_1$ , в результате чего критические условия воспламенения будут определяться формулой (1), где параметры, характеризующие металл, необходимо брать с индексом «1», т. е. для жидкого Mg. Зависимость  $T_{0кр}(d_0)$ , вытекающая из (1), в координатах

$$\ln \frac{d_0}{Nu_{0кр}^{-2}}; T_{0кр}^{-1} \quad (4)$$

есть прямая линия, угол наклона которой к оси абсцисс определяет величину энергии активации  $E_1$  при окислении жидкого Mg, а отрезок, отсекаемый на оси ординат, — величину  $Q_1 \rho_1 K_1 (C_\infty^m)_1$  (область воспламенения 1 на рис. 2, а).

Если угол наклона прямой скорости теплоотвода меньше, чем для прямой II (т. е.  $T_{0кр} < T_{о1}$ ), то критические условия воспламенения будут определяться из условия касания прямой скорости теплоотвода к функции тепловыделения  $g_2$ , т. е. кинетикой окисления кристаллического Mg (область 2). В уравнение (2) вместо  $g$  надо подставить  $g = g_2$ , в результате чего критические условия будут определяться формулой (1), в которой параметры, относящиеся к металлу, необходимо брать с индексом 2, т. е. для кристаллического Mg. Зависимость  $T_{0кр}(d_0)$ , представленная в координатах (4), определяет кинетические параметры окисления кристаллического Mg.

Если же  $T_{о1} < T_{0кр} < T_{пл}$ , то критические условия воспламенения, как видно из диаграммы, определяются равенством скоростей тепловыделения  $g_2$  и теплоотвода при  $T = T_{пл}$  (область 3). Приравнявая в точке  $T = T_{пл}$  скорость тепловыделения и теплоотвода из (2) и (3), получим

$$(T_{пл} - T_{0кр}) = \frac{1}{\lambda} \cdot Q_2 \rho_2 K_2 (C_\infty^m)_2 e^{-E_2/RT_{пл}} \cdot \frac{d_0}{Nu} = \text{const} \cdot \frac{d_0}{Nu}. \quad (5)$$

Зависимость  $T_{0\text{кр}}(d_0)$ , вытекающая из (5), спрямляется в координатах

$$(T_{\text{пл}} - T_{0\text{кр}}); d_0/\text{Nu}, \quad (6)$$

которые существенно отличаются от координат (4). Угол наклона прямой к оси ординат (в отличие от областей 1 и 2) не связан с величиной энергии активации. Другими словами, из зависимости (5) нельзя определить кинетические параметры окисления Mg.

Таким образом, критические условия воспламенения частиц могут определяться либо выражением (1), позволяющим находить кинетические константы окисления жидкого или кристаллического Mg, либо выражением (5), в зависимости от соотношения между критической температурой воспламенения  $T_{0\text{кр}}$  и температурами  $T_{01}$  и  $T_{011}$  (качественно вид зависимости  $T_{0\text{кр}}(d_0)$  для областей 1, 2, 3 показан на рис. 2, б).

Для нахождения  $T_{011}$  запишем условие касания скорости теплоотвода к функции тепловыделения  $g_2$  в точке  $T = T_{\text{пл}}$ , используя (2) и (3):

$$(T_{\text{пл}} - T_{011}) = \frac{RT_{\text{пл}}^2}{E_2}. \quad (7)$$

Таким образом, величина  $T_{011}$  оказывается меньше  $T_{\text{пл}}$  на один характеристический интервал, рассчитанный по кинетике окисления кристаллического Mg.

Величина  $T_{01}$ , как видно из рис. 2, а, меньше, чем  $T_{\text{пл}}$ . Легко показать, что при  $g_1(T_{\text{пл}}) \gg g_2(T_{\text{пл}})$   $T_{01}$  очень близка к  $T_{\text{пл}}$ , так что в первом приближении можно считать  $T_{01} \approx T_{\text{пл}}$ .

Преобразуем выражение (5) к переменным  $\ln(d_0/\text{Nu}T_{0\text{кр}}^2)$ ;  $T_{0\text{кр}}^{-1}$ . Деля обе части (5) на  $T_{0\text{кр}}^2$  и логарифмируя, получим

$$\ln \frac{d_0}{\text{Nu}T_{0\text{кр}}^2} = \ln \left( \frac{T_{\text{пл}}}{T_{0\text{кр}}^2} - \frac{1}{T_{0\text{кр}}} \right) + \text{const}. \quad (8)$$

Сравним выражение (8), определяющее критические условия воспламенения в области 3, с выражением (1), которое определяет критические условия воспламенения в областях 1, 2. Если выражение (1) представить в координатах (4) и продифференцировать по величине  $x = T_{0\text{кр}}^{-1}$ , то получим значение энергии активации для жидкого или кристаллического Mg:

$$\frac{d}{dx} \left( \ln \frac{d_0}{\text{Nu}T_{0\text{кр}}^2} \right) - \frac{E_{1,2}}{R} = \text{const} \quad (9)$$

(где  $E_{1,2}$  означает, что энергия активации соответствует окислению жидкого или кристаллического Mg). Если (8) продифференцировать по величине  $x = T_{0\text{кр}}^{-1}$ , то получим некоторую функцию, которую обозначим через  $E_{\text{каж}}$

$$\frac{d}{dx} \left( \ln \frac{d_0}{\text{Nu}T_{0\text{кр}}^2} \right) = \frac{T_{0\text{кр}}(2T_{\text{пл}} - T_{0\text{кр}})}{T_{\text{пл}} - T_{0\text{кр}}} = \frac{E_{\text{каж}}(T_{0\text{кр}})}{R}. \quad (10)$$

Величина  $E_{\text{каж}}$  в области 3, так же как и величины  $E_{1,2}$  в областях 1 и 2, представляет собой тангенс угла наклона кривой  $\ln(d_0/\text{Nu}T_{0\text{кр}}^2)$  к оси абсцисс. Однако по физическому смыслу  $E_{\text{каж}}$ , в отличие от  $E_1$  и  $E_2$ , не является энергией активации. Это некоторая переменная величина — кажущееся значение энергии активации, которая получается, если обработку экспериментальных данных, относящихся к области 3, проводить в координатах (4), которые обычно используют в гетерогенной модели

воспламенения. Значение  $E_{\text{наж}}$  зависит от разности  $T_{\text{пл}} - T_{0\text{кр}}$ , причем, как видно из (10), величина  $E_{\text{наж}}$ , при малых значениях  $T_{\text{пл}} - T_{0\text{кр}}$ , может быть очень большой.

Проанализируем экспериментальные данные [1, 2, 4], представленные на рис. 1, на основе полученных выше результатов. Как следует из изложенного, для тех размеров частиц, температура воспламенения которых выше  $T_{\text{пл}}$  (точки, расположенные выше горизонтальной линии  $T = T_{\text{пл}}$  на рис. 1) [1, 2], экспериментальная зависимость  $T_{0\text{кр}}(d_0)$  в координатах (4) должна укладываться на прямую линию. Спрямление экспериментальных данных [1, 2, 4] в координатах (4) показано на рис. 3, а. Из рисунка видно, что левее вертикальной линии  $T = T_{\text{пл}}$  (т. е. для жидкого Mg) экспериментальные данные [1, 2, 4] хорошо укладываются на прямую линию, тангенс угла наклона которой соответствует  $E_1 \approx 23$  ккал/моль (с точностью до нескольких ккал/моль), а величина  $Q_{1p_1}K_1(C_{\infty}^m)_1 \approx 4 \cdot 10^5$  кал/(см<sup>2</sup> · с), если принять по [4].  $\lambda = 1,6 \times 10^{-4}$  кал/(см · с · град) (штриховая кривая на рис. 1 построена для этих кинетических параметров). Если сравнить данные, характеризующие окисление жидкого Mg, с данными по кинетике окисления кристаллического Mg [10, 11], то окажется, что вблизи  $T = T_{\text{пл}}$  скорость окисления жидкого Mg превышает скорость окисления кристаллического Mg на 2—3 порядка.

Экспериментальные точки работ [1, 2, 4], для которых  $T_{0\text{кр}} < T_{\text{пл}}$ , лежат в области 3, т. е. для них  $T_{0\text{пл}} < T_{0\text{кр}} < T_{0\text{т}}$ . Действительно, согласно [1, 2, 4], для этих точек  $(T_{\text{пл}} - T_{0\text{кр}}) \approx 30^\circ$ . В то же время разность (7) при использовании литературных данных для  $E_2$ , равна:  $(T_{\text{пл}} - T_{0\text{пл}}) \approx 35^\circ$  ( $E_2 = 50,5$  ккал/моль [10]), или  $(T_{\text{пл}} - T_{0\text{пл}}) \approx 70^\circ$  ( $E_2 = 23,7$  ккал/моль [11]). Таким образом, экспериментальные данные [1, 2, 4], для которых  $T_{0\text{кр}} < T_{\text{пл}}$ , должны спрямляться в координатах (6). Это и подтверждает<sup>4</sup> рис. 3, б.

Здесь, однако, необходимо отметить следующее. Рис. 3, б должен рассматриваться не более как иллюстрация, так как измерение разности двух больших чисел  $(T_{\text{пл}} - T_{0\text{кр}})$  требует большой точности измерения  $T_{0\text{кр}}$ . Точность измерения, которая указывается в работах [1, 2, 4], недостаточна, поэтому рис. 3, б не может быть использован с целью получения каких-либо количественных результатов.

Для сравнения с теоретическими выводами данные [1, 2, 4], для которых  $T_{0\text{кр}} < T_{\text{пл}}$ , целесообразно представить в координатах (4), не содержащих разности  $(T_{\text{пл}} - T_{0\text{кр}})$ . Учитывая, однако, что величина

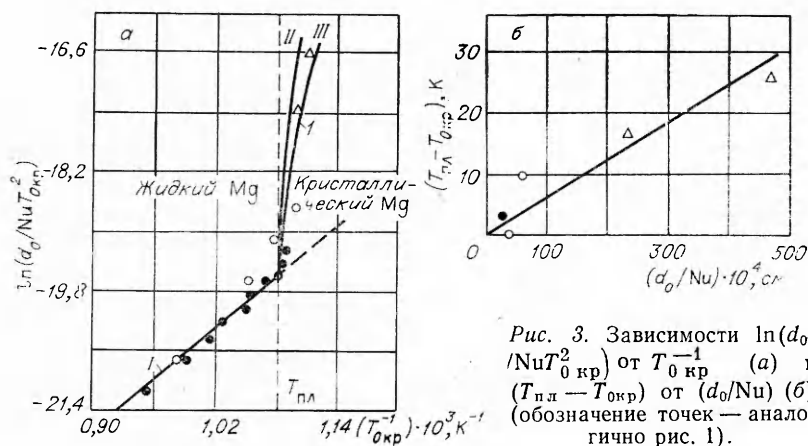


Рис. 3. Зависимости  $\ln(d_0/NuT_{0\text{кр}}^2)$  от  $T_{0\text{кр}}^{-1}$  (а) и  $(T_{\text{пл}} - T_{0\text{кр}})$  от  $(d_0/Nu)$  (б) (обозначение точек — аналогично рис. 1).

<sup>4</sup> Если провести прямую только по точкам работы [2] (светлые точки на рис. 3, а), то получим  $E \approx 38$  ккал/моль в соответствии с [2].

const, входящая в выражение (8), которое описывает критические условия воспламенения для этой группы точек, неизвестна, воспользуемся тем, что  $g_1(T_{пл}) \gg g_2(T_{пл})$ , как было показано выше. Тогда  $T_{0г} \approx T_{пл}$  (с учетом различия  $T_{0г}$  и  $T_{пл}$  кривая зависимости (8) несколько сместится вправо). В этом случае величину const в (8) приближенно можно определить из условия пересечения вертикальной линии  $T = T_{пл}$  с прямой  $I$  (см. рис. 3, *a*). Построенная в этом приближении кривая (8) обозначена на рис. 3, *a* цифрой *II*. Кривая *III* на рис. 3, *a* построена аналогичным способом, но с учетом теплотерь на излучение, когда температура стенок камеры, в которой происходит воспламенение частиц, равна температуре газа  $T_{0кр}$  (в [9] показано, что учет излучения в этом случае сводится к замене в выражениях (1) или (8) числа Nu на  $Nu_{эфф} = Nu(1 + 4\epsilon\sigma T_{0кр}^3 d_0 / Nu)$ , где  $\epsilon$  — степень черноты поверхности частицы,  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана, остальные обозначения те же, что и выше). Из рис. 3, *a* видно, что совпадение экспериментальных данных с теоретическими кривыми *II*, *III* удовлетворительное. Значения  $E_{наж}$  для этих кривых очень большие. Например, для точки *I*, взятой из работы [4],  $E_{наж} \approx 100$  ккал/моль.

Таким образом, экспериментальные точки работ [1, 2, 4], для которых  $T_{0кр} > T_{пл}$ , позволяют определить кинетические константы жидкофазного окисления Mg. Данные работ [1, 2, 4], для которых  $T_{0кр} < T_{пл}$ , лежат в области 3 и поэтому не могут быть использованы для определения кинетических констант.

Из изложенного следует, что изменение кинетического закона окисления, обусловленное плавлением металла на стадии разогрева частицы за счет химической реакции окисления, может оказать значительное влияние на процесс воспламенения даже в том случае, когда окисная пленка не обладает защитными свойствами<sup>5</sup>.

Если вид кинетического закона окисления в результате плавления металла не изменяется, но окисная пленка обладает защитными свойствами, влияние плавления металла на критические условия воспламенения может быть обусловлено значительным уменьшением скорости тепловыделения в результате изотермического увеличения толщины окисной пленки.

Отделение ИХФ АН СССР,  
Черноголовка

Поступила в редакцию  
15/VII 1975

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. М. Cassel, L. Liebman. Combust. Flame, 1959, 3, 4.
2. Н. М. Cassel, L. Liebman. Combust. Flame, 1963, 7, 1.
3. М. А. Гуревич, А. М. Степанов. ФГВ, 1968, 4, 2.
4. Г. К. Ежовский, А. С. Мочалова и др. — В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
5. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., «Наука», 1967.
6. Б. И. Хайкин, В. Н. Bloshenko, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1970, 6, 4.
7. П. Ф. Похил, А. Ф. Беляев и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М., «Наука», 1972.
8. Н. Н. Семенов. ЖРФХО, 1928, ч. физ., 60, 241.
9. В. Н. Bloshenko, Б. И. Хайкин. ФГВ, 1975, 11, 5.
10. T. Leontig, F. Phines. Trans. AIMME, 1946, 166, 265.
11. И. А. Маколкин. ЖПХ, 1951, 24, 460.

<sup>5</sup> Если  $T_{пл}$  металла значительно ниже  $T_{0кр}$ , т. е. плавление металла происходит на стадии кондуктивного нагрева частицы газом, то процесс плавления металла оказывает незначительное влияние на условия воспламенения, но может заметно повлиять на период индукции (необходимо время для расплавления частицы).