

В.И. Горшков, Л.П. Возман, А.Ю. Шебеко
(ФГБУ ВНИИПО МЧС России),
С.В. Добровенко
(ОАО НИПТБ «Онега»)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАЖИГАНИЯ ПЛАСТИНЫ МЕТАЛЛА ПРИ НАЛИЧИИ БОКОВЫХ ТЕПЛОПОТЕРЬ

Гетерогенное воспламенение металла представляет собой процесс, включающий в себя целый комплекс последовательных физико-химических стадий. Конечному акту химического взаимодействия атомов металла и окислителя предшествует диффузия молекул окислителя к поверхности

металла, адсорбция окислителя на поверхности, диффузия окислителя через защитный слой оксида металла. Как правило, в этой совокупности стадий наиболее медленной, лимитирующей стадией является диффузия окислителя через слой оксидной пленки, которая определяет суммарную кинетику процесса. По такому защитному механизму происходит окисление циркония, титана, гафния, железа, никеля и других металлов [1]. Однако для ряда металлов характерен быстрый переход к незащитному окислению. Он может быть обусловлен появлением в оксидной пленке при ее росте трещин как вследствие механических напряжений, так и ее растворением, разложением или испарением. При этом скорость тепловыделения гетерогенной реакции определяется скоростью химического взаимодействия окислителя с металлом, а также диффузионным переносом окислителя к поверхности металла. Однако возможны условия, когда процесс идет в кинетической области, т. е. роль диффузии мала, что возможно при больших концентрациях и скоростях диффузии окислителя и характерно для начальных стадий прогрева металла при его зажигании.

Наибольшее количество работ посвящено расчету параметров зажигания конденсированных твердых тел, в объеме которых протекает химическая реакция. Из анализа этих работ (в частности [2, 3]) вытекает, что критические условия воспламенения (например, температура) не зависят от толщины пластины металла. Такой вывод противоречит наблюдаемому опыту, из которого следует, что горение пластин возможно только в случае, если их толщина меньше некоторой предельной величины.

Рассмотрена задача о воспламенении бесконечной пластины металла, нагретой до температуры T_0 и помещен-

ной в среду газообразного окислителя, имеющего ту же температуру. На торце пластины за счет экзотермической химической реакции выделяется тепло, идущее на прогрев ее массы. Перенос тепла от пластины в окружающую среду осуществляется через ее боковую поверхность. При этом считаем, что тепловыделение на боковой поверхности из-за тормозящей химическую реакцию оксидной пленки мало по сравнению с аналогичным тепловыделением на торце. Модель имитирует зажигание пластины при резке металла или ее воспламенение при пожаре, когда торец пластины подвержен высокой температуре.

Математическое описание задачи в этом случае приводит к решению уравнения теплопроводности [4]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\alpha P}{S} (T - T_0), \quad (1)$$

где c – теплоемкость металла; ρ – плотность металла; λ – коэффициент теплопроводности; α – коэффициент теплоотдачи; P – периметр пластины; S – поперечное сечение пластины; T – температура; t – время; x – координата.

Учитывая, что толщина пластины r значительно меньше ее высоты, отношение периметра к поперечному сечению можно записать:

$$\frac{P}{S} = \frac{2}{r}, \quad (2)$$

а уравнение (1) в виде

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \omega (T - T_0), \quad (3)$$

где

$$\omega = \frac{2\alpha}{cpr}, \quad (4)$$

α – температуропроводность металла.

Условиями однозначности будут:

$$t = 0, \quad T = T_0; \quad (5)$$

$$x = 0, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = Q_s k_0 e^{\frac{E}{RT}}; \quad (6)$$

$$x = \infty, \quad T = T_0, \quad (7)$$

где Q_s, k_0 – тепловой эффект поверхностной реакции и предэкспоненциальный множитель соответственно; R – универсальная газовая постоянная; E – эффективное значение энергии активации реакции окисления.

После преобразований и решений в безразмерном виде [4] для расчета толщины пластины при воздействии на нее очага высокотемпературного пламени в размерном виде получим уравнение

$$\sqrt{\frac{r}{2\alpha\lambda}} \frac{Q_s k_0 E e^{\frac{E}{RT_0}}}{RT_0^2} = \frac{1}{c}. \quad (8)$$

Все параметры, входящие в уравнение (8), известны или их можно рассчитать, за исключением произведения $Q_s k_0$. Найдем эту величину, воспользовавшись экспериментальными данными по определению критической толщины пластины титана при зажигании ее с торца в очаге модельного пожара с температурой окружающей среды 1700 К. Как показали эксперименты, пластины толщиной более 0,5 мм не зажигаются при заданных условиях теплообмена. Величину энергии активации при окислении титана в воздухе примем равной $E = 207\,000$ Дж/моль [5], $\lambda = 16,7$ Вт/(м · К) [6].

Коэффициент теплоотдачи для пластины высотой $L = 0,15$ м при ламинарном режиме теплообмена определим из соотношений [7]:

$$Nu = 0,13Ra^{0,25}; \quad (9)$$

$$Ra = \frac{qL^3}{\nu a} \frac{RT_0^2}{E}; \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{NuL}{\lambda_g}, \quad (11)$$

где $\lambda_g = 9,15 \cdot 10^{-2}$ [8] – коэффициент теплопроводности газовой среды, Вт/(м · К); $\nu = 2,21 \cdot 10^{-4}$ [8] – кинематическая вязкость газовой среды, м²/с; $a = 3,92 \cdot 10^{-4}$ [8] – температуропроводность, м²/с; g – ускорение силы тяжести.

Подставляя значения приведенных выше параметров в выражения (8)–(11), получим $\alpha = 2,7$ Вт/(м² · К), $k_0 = 4,17 \cdot 10^{10}$ Дж/(м² · с).

Поскольку все параметры, входящие в уравнение (8), известны, появляется возможность проследить, каким образом влияют на температуру Q_s изменение толщины пластины r и начальной температуры T_0 .

Расчеты показали, что для толщины менее 0,5 мм температура поверхности на торце пластины больше критической величины, а следовательно, при таких температурах происходит зажигание пластины. При большей толщине пластины зажигание отсутствует.

Проведенный анализ позволил установить основные характеристики зажигания металлической пластины, определяемые критическим условием воспламенения. Расчетные значения критической толщины металлической пластины (например, титана) удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [9].

Литература

1. Кофстад П. Высокотемпературное окисление металлов. М.: Мир, 1969. 392 с.
2. Розенбанд В.И. О воспламенении блока и пластины металла в окислительной среде // ФГВ. 1974. Т. 10, № 1. С. 52–56.
3. Критические условия и период индукции воспламенения пластины металла в неподвижной окислительной среде / С.С. Рыбанин [и др.] // ФГВ. 1986. Т. 22, № 3. С. 2–10.
4. Каслоу Г., Еггер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 487 с.
5. Гудмен Т.Р.Дж. Применение интегральных методов в нелинейных задачах нестационарного теплообмена // Проблемы теплообмена. М.: Атомиздат, 1967. С. 4–96.
6. Брошштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Гос. изд-во технико-теоретической лит., 1953. 608 с.
7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1970. 720 с.
8. Грива В.А., Розенбанд В.И. Некоторые методологические приемы определения кинетики низкотемпературного окисления металлов неизотермическим термографическим методом // Проблемы технологического горения. Черноголовка, 1981. С. 26–30.
9. Зажигание пластин титана при высокотемпературном нагреве / Л.П. Вогман [и др.] // Проблемы горения и тушения пожаров: сб. науч. тр. Вып. 5. М.: ВНИИПО, 2014. ДСП.