

## ЛИТЕРАТУРА

1. Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б. Тепловая защита.— М.: Энергия, 1976.
2. Панкратов Б. М., Полежаев Ю. В., Рудько А. К. Взаимодействие материалов с газовыми потоками.— М.: Машиностроение, 1975.
3. Бояринцев В. И., Звягин Ю. В. Исследование разрушения углеграфитовых материалов при высоких температурах // ТВТ.— 1975.— 13, № 5.— С. 1045.
4. Кесвани С. Т., Андироглу Е., Кемпбел Дж. Д. и др. Эрозия графитовых сопел в модельных ракетных двигателях // АЭКТ.— 1986.— 4, № 1.— С. 117.
5. Куо К., Keswani S. T. A comprehensive theoretical model for carbon — carbon composite nozzle recession // Combust. Sci. Technol.— 1985.— 42.— Р. 145.
6. Зинченко В. Н., Якимов А. С. Режимы термохимического разрушения углефенольного композиционного материала под действием теплового потока // ФГВ.— 1988.— 24, № 2.— С. 141.
7. Механизм и кинетика восстановления металлов.— М.: Наука, 1970.
8. Шишков А. А., Панин С. Д., Румянцев Б. В. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива: Справочник.— М.: Машиностроение, 1988.
9. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред.— М.: Наука, 1978.
10. Никитин А. Т., Юревич Ф. Б. Теоретическое исследование нестационарного нагрева и уноса коксующихся полимерных материалов // Тепло- и массоперенос.— Т. 2, Ч. 2.— Минск: Изд-во ИТМО АН БССР, 1972.— С. 295.
11. Гришин А. М. Математическое моделирование некоторых нестационарных аэротермохимических явлений.— Томск: Изд-во Том. ун-та, 1973.
12. Шленский О. Ф. Тепловые свойства стеклопластиков.— М.: Химия, 1973.
13. Страхов В. Л., Чубаков Н. Г. Расчет нестационарного прогрета и уноса массы вспучивающихся покрытий в горячих газовых потоках // ИФЖ.— 1988.— 55, № 4.— С. 571.
14. Кожевников Г. Н., Водопьянов А. Г. Низшие окислы кремния и алюминия в электрометаллургии.— М.: Наука, 1977.
15. Будаков Б. М., Гольдман Н. Л., Успенский А. Б. Разностные схемы с выпрямлением фронтов для решения многофронтовых задач типа Стефана // Докл. АН СССР.— 1966.— 167, № 4.— С. 735.
16. Самарский А. А. Теория разностных схем.— М.: Наука, 1983.
17. Бураков В. А., Санду С. Ф. Численное решение задач нестационарной теплопроводности и уноса теплозащитных материалов при осаждении конденсированной фазы // Материалы Всесоюз. выставки программных комплексов по численному решению задач термомеханики.— М.: Изд-во МГТУ, 1990.— С. 10.

г. Томск

Поступила в редакцию 18/II 1992

УДК 541.126 ÷ 541.621 ÷ 546.47

*В. А. Безпрозванных, В. А. Ермаков, А. А. Раздобреев*

### ИНДУКЦИОННЫЙ ПЕРИОД НАГРЕВА ЧАСТИЦ МЕТАЛЛА НЕПРЕРЫВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований лазерно-термохимического окисления частиц алюминия на стадии, предшествующей воспламенению. Найдены значения термодиффузионных констант и оптических постоянных оксидного слоя. Получена информация об изменении температуры мишени, фактора поглощения излучения, толщины слоя окисла в процессе нагрева. Обсуждаются возможности реализации термохимической неустойчивости.

Нагрев металлов излучением оптического квантового генератора — процесс существенно нестационарный. Динамика его определяется положительной обратной связью между окислением, ростом температуры и изменением поглощательной способности. Соответствующее сочетание режимно-геометрических параметров приводит к реализации термохимической неустойчивости, обеспечивающей возможность быстрого прогрета мишени до температуры, при которой не исключены эффекты взрывного испарения. Подобные условия могут реализоваться в фокусе излучения мощного лазера типа ЛАТУС-31, используемого при нанесении мелкодисперсных порошков металлов на различные поверхности. Дробление частиц может способствовать как оптимизации самого процесса нанесения

© В. А. Безпрозванных, В. Е. Ермаков, А. А. Раздобреев, 1992.

покрытия, так и созданию соответствующих условий для достижения необходимой степени шероховатости.

В работе [1] изучались причины, приводящие к взрыву сферических частиц алюминия в поле излучения CO<sub>2</sub>-лазера, работающего в режиме непрерывной генерации. Используемая математическая модель не учитывала вклада в тепловой баланс мишени энергии, выделяющейся при окислении металла, потери на тепловое излучение от частицы считались пренебрежимо малыми. Для моделирования фактора поглощения системы окисел — металл принято приближение, справедливое лишь для малых по сравнению с длиной волны излучения толщин окисной пленки, не описывающее наблюдаемые в эксперименте интерференционные осцилляции параметров в слое окисла. В итоге процесс лазерного нагрева металлической мишени удалось описать лишь на физическом уровне строгости. К этому следует добавить, что не было возможности прямого сравнения расчетных и экспериментальных распределений, поскольку в литературе нет надежных данных по значениям оптических постоянных оксида алюминия, равно как и термодиффузионных констант. В настоящей работе обсуждаются некоторые экспериментальные результаты и данные численного анализа, позволяющие указанные недостатки устранить.

В качестве объекта воздействия непрерывного лазерного излучения выберем термически тонкий металлический образец (предполагаем отсутствие градиента температуры в объеме мишени). Запишем уравнение баланса энергии в пренебрежении испарением за время прогрева

$$mc \frac{dT}{dt} = A(x)W + \rho SH \frac{dx}{dt} - \chi S \sigma (T^4 - T_0^4) - \alpha S (T - T_0), \quad (1)$$

где  $m$  — масса образца;  $c$  — теплоемкость металла;  $S$  — площадь поверхности мишени;  $\alpha$  — коэффициент конвективного теплообмена;  $\alpha = \lambda_1/r$ , если облучается сферическая частица радиуса  $r$ , находящаяся в среде с коэффициентом теплопроводности  $\lambda$ ;  $A(x)$  — поглощательная способность системы окисел — металл;  $x$  — текущая толщина окисного слоя;  $T$  — температура;  $t$  — время;  $W$  — мощность воспринимаемого мишенью лазерного излучения;  $W = qS/4$ , если образец сферической формы ( $q$  — плотность потока энергии излучения);  $\rho$  — плотность металла;  $H$  — удельная теплота реакции окисления;  $\chi$  — степень черноты окисной пленки;  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана;  $T_0$  — температура окружающей среды. Для уравнения (1) начальное условие имеет вид:  $T|_{t=0} = T_0$ .

Для описания кинетики экзотермического окисления металла воспользуемся соотношением

$$\frac{dx}{dt} = \frac{d}{x} \exp(-E/RT), \quad (2)$$

где  $d$  и  $E$  — константы;  $R$  — универсальная газовая постоянная. Выбирая параболический закон окисления (2), тем самым ограничиваемся начальной стадией прогрева, когда скорость реакции контролируется диффузией ионов в слое окисла. Начальное условие для (2) имеет вид:  $x|_{t=0} = x_0$ ,  $x_0$  — начальная толщина окисного слоя.

Изменение в процессе нагрева поглощательной способности окисляющейся металлической мишени будем описывать решением задачи электродинамики об отражении света от слоя, заключенного между двумя однородными средами различной оптической плотности [2, 3]. Соответствующее выражение для поглощательной способности системы окисел — металл как функции толщины окисла запишем в виде [4]

$$A(x) = 1 - |r|^2, \\ r = \frac{r_{12} \exp(-2i\psi) + r_{23}}{\exp(-2i\psi) + r_{12} r_{13}}, \quad (3)$$

$$r_{12} = \frac{1 - \sqrt{\varepsilon}}{1 + \sqrt{\varepsilon}}, r_{13} = \frac{1 - \sqrt{\varepsilon_0}}{1 + \sqrt{\varepsilon_0}}, r_{23} = \frac{r_{12} - r_{13}}{r_{12}r_{13} - 1},$$

$$\sqrt{\varepsilon} = n + i\kappa, \sqrt{\varepsilon_0} = n_0 + i\kappa_0, \psi = \frac{2\pi x}{\lambda} \sqrt{\varepsilon},$$

В соотношениях (3)  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость окисла и металла;  $n$  и  $n_0$  — показатели преломления окисла и металла;  $\kappa$  и  $\kappa_0$  — соответствующие показатели поглощения;  $r_{12}$  и  $r_{13}$  — амплитудные коэффициенты отражения излучения от окисла и металла;  $\lambda$  — длина волны падающего излучения.

С использованием методики лазерного нагрева [5] и динамического метода определения оптических постоянных, идея которого изложена в [6], авторами данной работы были определены оптические характеристики окисного слоя на сферических частицах алюминия. Диаметр используемых мишеней составлял 0,8–1,2 мм, мощность излучения CO<sub>2</sub>-лазера изменялась от 5 до 15 Вт. Температуру измеряли термопарами ВР5/20 толщиной ~20 мкм. Постоянная времени используемой при записи сигнала  $dT/dt$  RC-цепочки составляла ~0,01 с. На рис. 1 приведены характерные осциллограммы  $T(t)$  и  $dT/dt(t)$ , а на рис. 2 построены экспериментальная (1) и теоретическая (2) зависимости фактора поглощения от времени. По полученным экспериментальным данным найдено:  $n = 1,28 \pm 0,04$ ,  $\kappa = (2,27 \pm 0,52) \cdot 10^{-2}$ . Кроме того, оценены предэкспонент в параболическом законе окисления  $d = 1,61 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с и энергия активации реакции  $E/R = 12000$  К.

На основе уравнений (1)–(3) выполнен численный анализ лазерно-термохимического окисления алюминиевых частиц. При расчетах использовались следующие значения постоянных:  $\rho = 2700$  кг/м<sup>3</sup>,  $c = 1085$  Дж/(кг·К),  $H = 16139,24 \cdot 10^3$  Дж/кг,  $\chi = 0,3$ . Ниже представ-

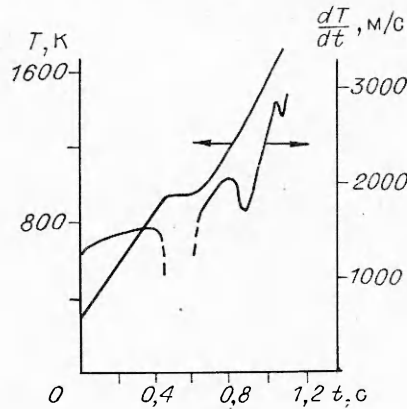


Рис. 1.

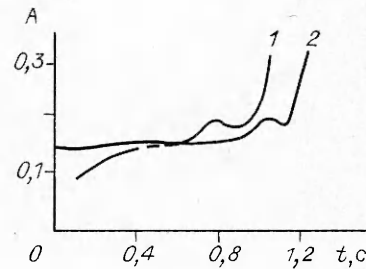


Рис. 2.

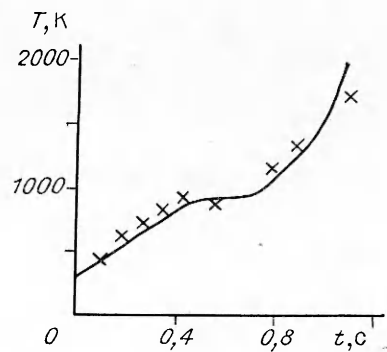


Рис. 3.

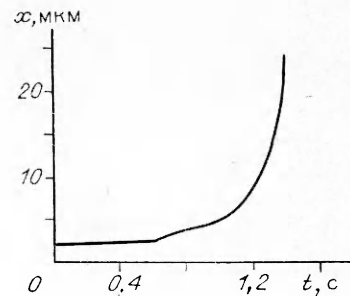
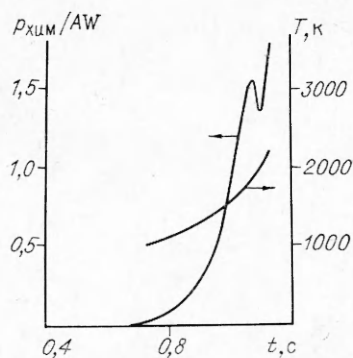


Рис. 4.

Рис. 5.

лены результаты, относящиеся к частице диаметром 0,97 мм, нагреваемой излучением постоянной мощности 12,5 Вт. Рис. 3 иллюстрирует расчетное изменение температуры частицы во времени (кривая) в сопоставлении с данными измерений (точки), а на рис. 4 показан рост пленки окиси в процессе нагрева.

Численный эксперимент позволил изучить вопрос об относительном изменении мощности энергии, получаемой частицей металла в результате развития процессов поглощения излучения и экзотермической реакции окисления. На определенной стадии лазерного нагрева резко ускоряется приток энергии к мишени, что обусловлено увеличением степени поглощения за счет роста поглощательной способности системы окисел — металл, а также возрастанием вклада химической реакции. Относительную степень влияния указанных процессов иллюстрирует рис. 5. Видно, что при  $\sim 1500$  К энергетический вклад реакции окисления становится равным поглощаемой частицей мощности энергии лазера. Реализуется термохимическая неустойчивость, вследствие чего может либо воспламениться мишень, либо произойдет взрывное вскипание на имеющихся центрах зародышеобразования, а при достаточно высоких значениях интенсивности излучения лазера можно ожидать инициирования быстрого фазового перехода в соответствии с механизмом гомогенной нуклеации.



#### ЛИТЕРАТУРА

1. Безпрозванных В. А., Ермаков В. А., Раздобреев А. А. Взрыв металлических частиц в поле излучения оптического квантового генератора. Горение гетерогенных и газовых систем: Материалы 8-го Всесоюз. симп. по горению и взрыву.— Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1985.— С. 58.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред.— М.: Наука, 1982.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики.— М.: Наука, 1973.
4. Бойко В. И., Бункин Ф. В., Кириченко Н. А. и др. Диффузионные механизмы изменения поглощательной способности металлов в процессе их лазерного нагрева в воздухе // Докл. АН СССР.— 1980.— 250, № 1.— С. 78.
5. Раздобреев А. А., Скорик А. И., Фролов Ю. В. и др. Агломерация частиц алюминия в условиях нестационарного нагрева // ФГВ.— 1982.— 18, № 6.— С. 63.
6. Арзуов М. И., Бункин Ф. В., Кириченко Н. А. и др. Динамический метод измерения оптических и диффузионных констант окисных пленок // Письма в ЖЭТФ.— 1978.— 27, вып. 4.— С. 230.

г. Томск

Поступила в редакцию 10/VI 1991

УДК 532.593 + 541.12

В. И. Нифадьев, Н. М. Калинина

#### О РЕЗУЛЬТАТАХ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗИФИКАЦИИ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Рассмотрены фазовые переходы пенополистирола различной объемной плотности при ударно-волновом нагружении. Описывается механизм диссипации энергии ударных волн в пенополистироле. Приводятся результаты экспериментальных исследований, полученные при взрывании сверхлегкого пенополистирола в стальных трубах. Показано, что в определенных условиях его газификация протекает в режиме детонации.

© В. И. Нифадьев, Н. М. Калинина, 1992.