

Л.Г. Астафьева, А.П. Пришивалко

**ПОГЛОЩЕНИЕ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ И ОПТИЧЕСКИЕ ПОЛЯ  
ВНУТРИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ С ОКИСНОЙ ПЛЕНКОЙ**

Образование окисной пленки на поверхности алюминиевой частицы существенно изменяет условия распространения излучения внутри такой двухслойной частицы, что приводит к значительному увеличению доли поглощенной в ней энергии. Для рассмотренного интервала размеров частиц ( $0,1 < R_2 < 20$  мкм) даже не очень большая окисная оболочка, составляющая по толщине примерно 10% от радиуса частицы, увеличивает поглощение излучения в 15 раз по сравнению с металлической частицей такого же размера.

Известно, что в воздухе на поверхности металлических частиц может образовываться слой окисла. Толщина окисной пленки зависит от свойств окружающей среды, температуры, давления и т.п.

Экспериментально обнаружено [1], что при лазерном нагреве в воздухе поглощательная способность многих металлов изменяется. Причина этого состоит в том, что лазерное излучение стимулирует окислительно-восстановительные реакции на поверхности твердых тел. Под действием излучения происходит реакция окисления металлов в воздухе, образующийся слой изменяет поглощательную способность металлических частиц. Исследования таких процессов проводятся в лазерной макрокинетике [2–4]. Таким образом, всестороннее изучение металлических частиц с окисной пленкой представляет актуальную задачу.

Оптические свойства неокисленных металлических частиц были рассмотрены ранее [5, 6]. Аналогичные работы по исследованию оптических свойств металлических частиц с окисной пленкой пока не известны.

Оптические свойства окисляющейся металлической частицы можно описать в первом приближении с помощью модели двухслойной сферической частицы, состоящей из металлического ядра и оболочки из окиси металла. В настоящей работе оценивается поглощение таких двухслойных частиц и рассмотрены оптические поля внутри них в зависимости от их радиусов и толщины окисной пленки. Исследование проведено на примере частиц алюминия при длине волны воздействующего излучения  $\lambda = 10,6$  мкм. Оптические постоянные алюминия  $m = 34,2 - i109$  [7], окиси алюминия  $m = 0,52 - i0,063$  [8].

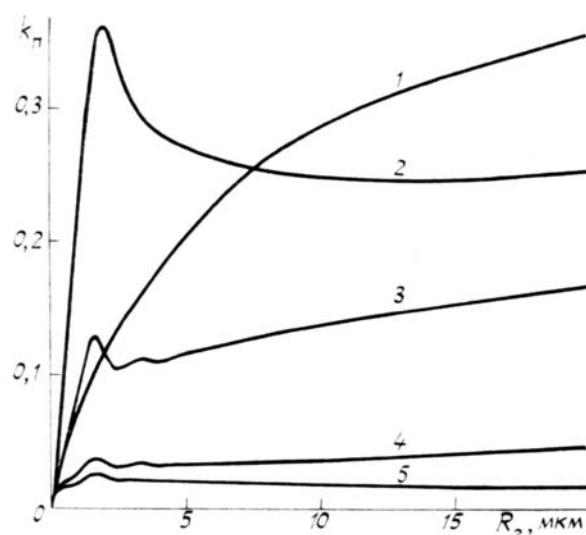


Рис. 1. Зависимости факторов эффективности поглощения двухслойных частиц от их внешнего радиуса. Цифры у кривых — значения отношения  $R_1/R_2$ : 1—0, 2—0,9, 3—0,99, 4—0,999, 5—1

На рис. 1 приведены зависимости факторов эффективности поглощения однородных частиц алюминия и окиси алюминия, а также двухслойных частиц с ядром из алюминия и оболочкой — из  $Al_2O_3$  от внешнего радиуса частиц  $R_2$ . Каждая линия построена при постоянном значении отношения

радиуса ядра  $R_1$  к внешнему радиусу двухслойной частицы  $R_2$ . При  $R_1/R_2 = 1$  (окисная оболочка отсутствует) имеем однородную частицу алюминия, при  $R_1/R_2 = 0$  — другой крайний случай — однородную частицу окиси алюминия. Промежуточные значения отношения  $0 < R_1/R_2 < 1$  характеризуют двухслойные частицы с окисной пленкой.

В рассмотренном интервале значений радиусов частиц  $0 < R_2 \leq 20$  мкм эффективность поглощения излучения однородной частицей алюминия мала ( $k_n \leq 0,026$ ), что объясняется высоким отражением излучения от поверхности металлов. Что же касается поглощения однородных частиц окиси алюминия, то в указанном интервале радиусов частиц фактор эффективности поглощения излучения частицами из  $Al_2O_3$  монотонно возрастает при увеличении их размера. Как видно из рис. 1, в интервале  $0 < R_2 \leq 20$  мкм эффективность поглощения частиц  $Al_2O_3$  значительно больше поглощения однородных частиц алюминия такого же размера (при  $R_2 \geq 10$  мкм в 17 и более раз).

При увеличении двухслойной частицы фактор эффективности ее поглощения сначала резко возрастает, достигнув максимума, затем уменьшается. Причем для  $R_1/R_2 = 0,999$  и  $R_1/R_2 = 0,99$  при дальнейшем увеличении  $R_2$  фактор эффективности поглощения почти сразу же начинает возрастать. В случае  $R_1/R_2 = 0,9k_n$  уменьшается в интервале размеров  $2 < R_2 < 15$  мкм и только потом несколько увеличивается.

Таким образом, наличие слоя окисла на поверхности алюминиевой частицы приводит к резкому увеличению поглощения излучения по сравнению с однородной частицей алюминия такого же размера. Например, даже тонкая окисная оболочка, составляющая по толщине примерно 1% от радиуса частицы ( $R_1 = 9,9$  мкм,  $R_2 = 10$  мкм), увеличивает поглощение излучения данной длины волны в 8 раз, а окисная пленка, составляющая примерно 10% по толщине от радиуса ( $R_1 = 9$  мкм,  $R_2 = 10$  мкм), вызывает рост поглощения в 15 раз. В диапазоне  $0,5 < R_2 < 7$  мкм поглощательная способность двухслойных частиц значительно выше, чем у частицы окиси алюминия этого размера.

В том же диапазоне размеров частиц увеличение толщины окисной пленки приводит сначала к возрастанию поглощения двухслойной частицы, а затем при некоторой толщине слоя окисла фактор эффективности поглощения начинает уменьшаться. Это вызвано, по-видимому, тем, что в не очень толстых оболочках двухслойных частиц происходит поглощение падающего и отраженного от металлического ядра света. В случае более толстых оболочек частиц влияние ядра ослабевает. При  $R_2 > 8$  мкм увеличение толщины окисной пленки сопровождается ростом поглощения двухслойной частицы.

Рассмотренное изменение поглощения частицами алюминия при образовании на них окисных пленок связано с распределением энергии внутри таких частиц. Распределение энергии внутри частиц алюминия, которое характерно и для других металлов, исследовано нами в [9]. Поглощенная энергия сконцентрирована в тонком слое вблизи поверхности частицы. Плотность энергии быстро убывает при удалении от поверхности частицы к ее центру, она уменьшается в  $e$  раз на слое толщиной порядка 0,1% от радиуса частицы. Максимальное значение плотности энергии находится в освещенной полусфере на поверхности частицы при  $\Theta = 0^\circ$ , т.е. на ближнем к источнику конце так называемого главного диаметра.

Характер распределения плотности энергии внутри алюминиевого ядра двухслойной частицы с окисной пленкой аналогичен распределению энергии в однородной частице алюминия. Максимальное значение энергии находится в освещенной полусфере на главном диаметре на поверхности ядра, но оно несколько ниже, чем в соответствующей по размеру однородной частице алюминия. В теневой полусфере наибольшее значение плотности энергии также находится на поверхности ядра, и оно также несколько меньше, чем соответствующая плотность энергии в частице алюминия. Максимум плотности энергии в ядре зависит от толщины окисной оболочки и уменьшается при ее увеличении. Это связано с тем, что при росте толщины оболочки все больше падающей на частицу энергии выделяется в оболочке и все меньше отражается от границы ядра.

Картина распределения энергии в оболочке из окиси алюминия совершенно иная. В некоторой степени она подобна распределению энергии в однородной частице из окиси алюминия, но имеет и отличие. В частности, максимальные значения плотности энергии, как и в однородной частице  $Al_2O_3$ , находятся не на главном диаметре частицы, а сдвинуты в область углов  $\Theta \approx 30 \div 80^\circ$ . На рис. 2 представлена картина распределения плотности энергии электрического поля, характеризующейся отношением

$$B = \frac{\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^*}{|\mathbf{E}_0|^2} \quad (\mathbf{E}_0, \mathbf{E} - \text{напряженности электрического поля в падающей на частицу плоской электро-}$$

магнитной волне и внутри частицы) [10] внутри двухслойной частицы с алюминиевым ядром и окисной пленкой. Для двухслойной сферической частицы с  $R_1 = 9,9$  мкм,  $R_2 = 10$  мкм максимальное значение плотности энергии составляет  $B = 13,7$  и находится в оболочке вблизи ее границы с ядром при  $\Theta \approx 73^\circ$ . Следует отметить, что графики распределения энергии в оболочке вдоль направлений  $0 \leq \Theta < |\pm 5^\circ|$  и  $175^\circ < \Theta < 185^\circ$  являются сильно осциллирующими. Это, очевидно, связано с интерференцией падающего и отраженного света в оболочке частицы, так как металлическое ядро сильно отражает падающее на него излучение. При  $\Theta > 5^\circ$  зависимость  $B(r)$  практически не осциллирует, а величина  $B$  незначительно возрастает от поверхности двухслойной частицы к ядру и достигает максимума, как уже отмечалось, вблизи границы ядра и оболочки. Эта тенденция проявляется сильнее

при уменьшении радиуса ядра двухслойной частицы. Значение  $B_{\text{макс}}$  оказывается выше в частицах с более тонкой окисной пленкой. При этом больше становится и угол, при котором располагается  $B_{\text{макс}}$ . Например, для частицы с внешним радиусом  $R_2 = 20$  и радиусом ядра  $R_1 = 19$  мкм  $B_{\text{макс}} \approx 4,7$  ( $\Theta \approx 52^\circ$ ), для  $R_2 = 20$ ,  $R_1 = 19,8$  мкм  $B_{\text{макс}} \approx 11$  ( $\Theta \approx 62^\circ$ ). Следует отметить также, что для направления  $\Theta = 90^\circ$  плотность энергии довольно высока по сравнению с аналогичным направлением в однородной частице  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

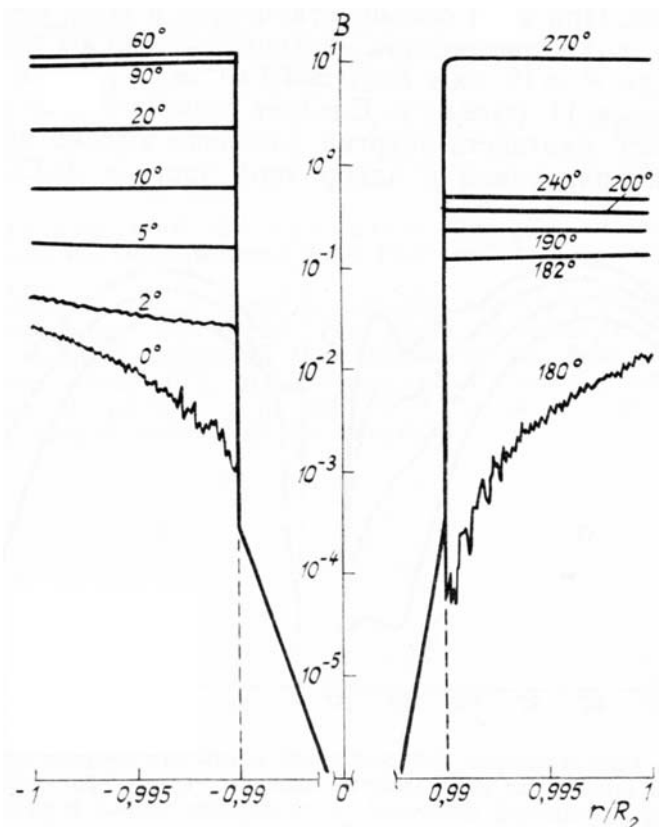


Рис. 2. Распределение относительной плотности энергии электрического поля  $B$  внутри двухслойной частицы с  $R_1 = 9,9$ ,  $R_2 = 10$  мкм. Цифры у кривых — значения угла  $\Theta$ . Штриховые линии соответствуют границе между ядром и оболочкой

Рассмотрим распределение энергии по поверхности частицы и в приповерхностном окисном слое в зависимости от угла  $\Theta$  (рис. 3). Плотность энергии максимальна в области углов  $50^\circ < \Theta < 80^\circ$  и на поверхности и в приповерхностном слое. Чем тоньше окисная пленка на поверхности алюминиевого ядра, тем выше максимум плотности энергии в оболочке двухслойной частицы.

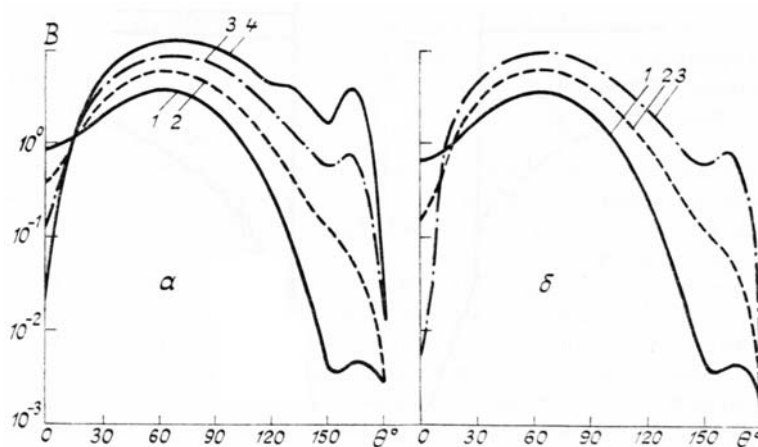


Рис. 3. Распределение относительной плотности энергии электрического поля  $B$  по поверхности частицы (а) и при  $r = 9,8$  мкм (б) внутри окисной оболочки двухслойных частиц с различным радиусом ядра  $R_1$ : 1—9; 2—9,5; 3—9,75; 4—9,9 мкм и постоянным внешним радиусом  $R_2 = 10$  мкм

Таким образом, появление даже тонкой окисной пленки на поверхности металлической частицы приводит к существенному изменению картины распределения энергии внутри нее и к соответствующему значительному увеличению поглощения падающего излучения. Аналогичные результаты получены при расчетах поглощения и распределения энергии внутри других металлических частиц с окисной пленкой.

1. Арзуов М.И., Конов В.И., Костин В.В., Метев С.М., Силенок А.С., Чаплиев Н.И. Исследование генетики нагрева металлов в газовой среде излучением непрерывного и импульсно-периодического CO<sub>2</sub>-лазера. М., 1977. 43 с. (Препринт/ФИ АН СССР, № 152).
2. Бункин Ф.В., Кириченко Н.А., Лукьянчук Б.С. //УФН. 1982. Т. 138. Вып. 1. С. 45–95.
3. Бункин Ф.В., Кириченко Н.А., Лукьянчук Б.С. //Вестник Академии наук СССР. 1987. № 12. С. 58–72.
4. Беспрозванных В.А., Ермаков В.А., Раздобреев А.А. //Материалы 8 Всес. симп. по горению и взрыву. Ташкент, 13–17 окт. 1986. Черноголовка, 1986. С. 58–62.
5. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 660 с.
6. Белов Н.Н. //Укр. физ. журнал. 1988. Т. 33. № 6. С. 831–834.
7. Ordal M.A., Long L.L., Bell R.J., Bell S.E., Bell R.R., Alexander R.W., Ward S.A. //Appl. Opt. 1983. V. 22. № 7. P. 1099–1119.
8. Всес. симп. по горению и взрыву. Ташкент, 13–17 окт. 1986. Черноголовка, температур. 1982. Т. 20. № 6. С. 1085–1092.
9. Астафьева Л.Г., Пришивалко А.П., Лейко С.Т. //Физика и химия обработки материалов. 1989. № 4. С. 35–40.
10. Пришивалко А.П. Оптические и тепловые поля внутри светорассеивающих частиц. Минск: Наука и техника, 1983. 190 с.

Институт физики АН БССР,  
Минск

Поступила в редакцию  
19 июня 1989 г.

**L.G. Astaf'eva, A.P. Prishyvalko. Absorption of the ir Radiation and Optical Fields Inside the Oxide-Watered Metal Particles.**

The oxide watering of an aluminum particle essentially changes the conditions for radiation propagation inside such two layers particles, resulting in the great increase of the radiation absorption. It is shown in the paper that even relatively thin oxide coating (about 10% of particle's radius) yields about 15 fold increase of the absorption by particles with radii from 0.1 to 20  $\mu\text{m}$ , compared to that observed for pure metallic particles of the same sizes.