

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ЧАСТИЦ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРОЦЕССЕ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛА- ЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

Р.В. Чкалов, ассистент

Д.А. Кочуев, доцент

Д.Г. Чкалова, старший преподаватель

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых
(Россия, г. Владимир)

DOI:10.24412/2500-1000-2023-7-2-84-87

Аннотация. В статье рассматривается проблематика процесса фемтосекундной лазерной абляции для синтеза мелкодисперсных порошков. Экспериментально доказано, что использование электростатического поля при лазерной абляции позволяет значительно уменьшить поглощение лазерного излучения аблируемыми частицами. В работе приводится аналитическая оценка скорости выноса частиц под действием электростатического поля путем построения математической модели процесса. Вычисления подтверждают экспериментальные предположения об эффективности метода.

Ключевые слова: фемтосекундная лазерная абляция, мелкодисперсный порошок, электростатическое поле.

Методом фемтосекундной лазерной абляции материала удается получать высокочистые частицы сферической формы с управляемой дисперсией размеров [1-3]. Однако в процессе синтеза мелкодисперсных порошков возникает проблема поглощения значительной части лазерного излучения аблируемыми частицами. Одним из наиболее эффективных способов решения этой проблемы является использование электростатического поля для удаления аблированных частиц, что приводит к выносу продуктов абляции из области распространения лазерного излучения без ухудшения качества поверхности [4-6].

Экспериментально доказана эффективность предлагаемого подхода. Например, для абляции титана в электростатическом поле при мощности 1450 мВт повышение эффективности составляет порядка 85%, для оксида алюминия – 70%.

Для подтверждения предположения о повышении эффективности лазерной аб-

ляции необходимо произвести аналитическую оценку скорости выноса частиц из области распространения лазерного излучения.

Математическая модель процесса

Для построения модели выноса частиц необходимо определить ряд условий. Во-первых, дистанцию, которую должна преодолеть частица для выхода из вероятной области распространения лазерного излучения. Возьмем ее равной 0,5 мм. Во-вторых, время, за которое частица должна покинуть заданную область, – 100 мкс (временной промежуток между лазерными импульсами при частоте следования 10 кГц). И, в-третьих, характерный диаметр частиц, синтезируемых в результате абляции ультракороткими лазерными импульсами, – составляет от 5 нм до 1 мкм и зависит от материала и режима воздействия (рис. 1 и 2).

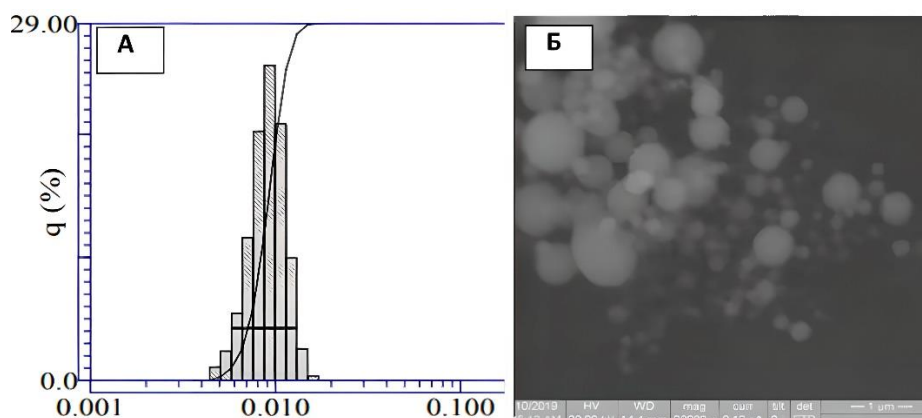


Рис. 1. Нанопорошок оксидной керамики на основе Al_2O_3 :

А – гистограмма распределения наночастиц по размерам, Б – РЭМ изображение полученных наночастиц.

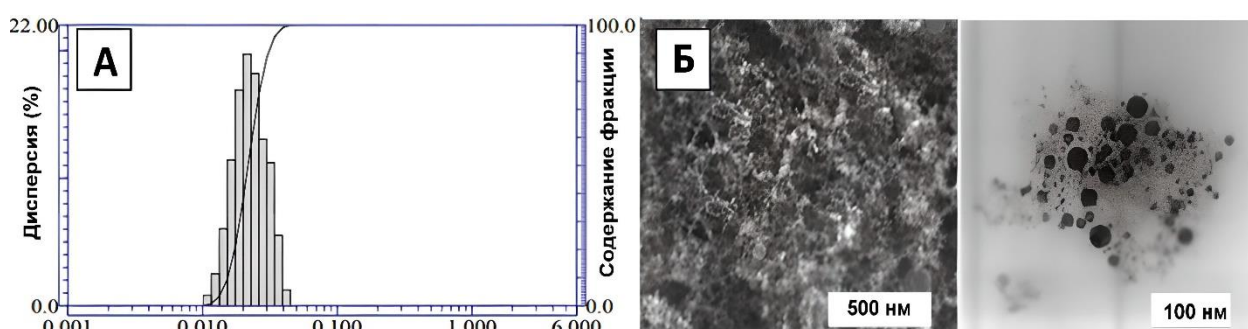


Рис. 2. Нанопорошок титана в среде аргона – дисперсия гранул составила 10-40 нм. А – гистограмма распределения наночастиц по размерам, Б – РЭМ изображение полученных наночастиц.

Чтобы покинуть область распространения лазерного излучения в межимпульсный промежуток времени, частица должна

приобрести скорость порядка 5 м/с, для этого необходима сила:

$$F_{el} - F_{st} = m \cdot a,$$

где F_{el} – напряженность электростатического поля, F_{st} – сила сопротивления

Стокса для сферических частиц, m – масса частицы, a – ускорение.

С другой стороны,

$$F_{el} = q \cdot E,$$

где q – заряд частицы, E – напряженность поля.

Заряд частицы определяется из соотношения $q = c \cdot \varphi$, c – емкость частиц, φ – электрический потенциал. Емкость частиц определяется как $c = 4\pi\epsilon\epsilon_0R$, ϵ – диэлектрическая проницаемость аргона (принимается равной единице), ϵ_0 – электрическая постоянная ($8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м), R – радиус сферической частицы. Потенциал $\varphi = U/2$, а напряженность поля в межэлек-

тродном промежутке равна 30 кВ. Поскольку аблированные частицы располагаются в центре межэлектродного промежутка, напряжение равно 15 кВ.

Сила сопротивления Стокса для сферических частиц $F_{st} = 3\pi \cdot \mu \cdot D \cdot v$,

μ – коэффициент динамической вязкости, D – диаметр частицы, v – скорость частицы. Итак, получили уравнение относительно скорости:

$$\frac{dv}{dt} + 3\pi \cdot \mu \cdot D \cdot \frac{v}{m} = \frac{qE}{m}.$$

Определим константы:

$$k_1 = \frac{3\pi\eta D}{m}, \quad k_2 = \frac{qe}{m}.$$

Тогда дифференциальное уравнение первого порядка относительно функции $v(t)$ с начальным условием имеет вид:

$$\frac{dv}{dt} + k_1 v = k_2, \quad v(0) = 0.$$

Частное решение этого уравнения:

$$v(t) = \frac{qe}{3\pi\eta D} \left(1 - \exp\left(-\frac{3\pi\eta D}{m} t\right) \right).$$

Результаты и выводы

Полученное распределение скоростей для сферических частиц титана в зависимости от размера представлено на рисунке 3.

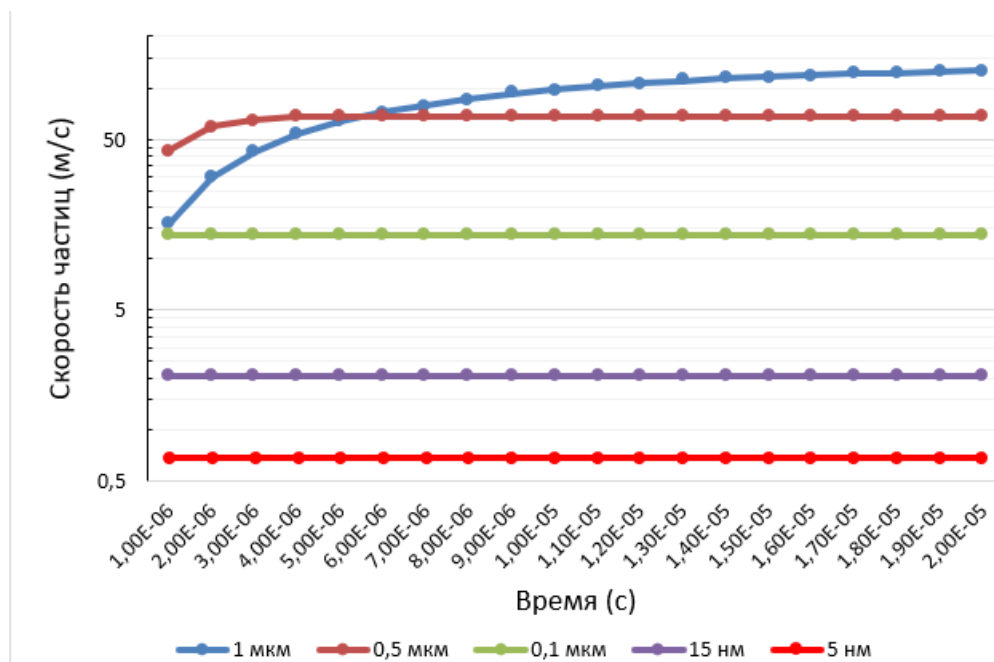


Рис. 3. Распределение скорости частиц титана различного диаметра в электростатическом поле напряженностью 30 кВ

Аналогичные результаты получены для порошков оксида алюминия. Метод оценки показывает приобретение аблируемыми частицами значительной скорости в результате воздействия электростатического поля. Таким образом, проведенные экспе-

рименты и подтверждающие их аналитические вычисления позволяют сделать вывод о высокой эффективности применения электростатического поля при синтезе мелкодисперсных порошков методом лазерной абляции.

Библиографический список

1. Ионин А.А., Кудряшов С.И., Самохин А.А. Абляция поверхности материалов под действием ультракоротких лазерных импульсов // Успехи физических наук. – 2017. – Т. 187. № 2. – С. 159-172.
2. Локтионов Е.Ю., Овчинников А.В., Протасов Ю.Ю., Протасов Ю.С., Ситников Д.С. Энергетическая эффективность фемтосекундной лазерной абляции полимерных материалов // Журнал прикладной спектроскопии. – 2012. – Т. 79. № 1. – С. 114-121.
3. Кочуев Д.А., Черников А.С., Абрамов Д.В., Вознесенская А.А., Чкалов Р.В., Хорьков К.С. Процессы абляции и роста структур при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов на поверхность галлия в среде аммиака // Журнал технической физики. – 2023. – Т. 93. № 4. – С. 473-480.
4. Иващенко А.В., Тарасова М.А., Кочуев Д.А., Прокошев В.Г., Хорьков К.С., Давыдов Н.Н. Синтез нанопорошковых керамических материалов на основе оксида алюминия под действием ультракоротких лазерных импульсов // Новые материалы и перспективные технологии. – 2020. – С. 573-576.
5. Кочуев Д.А., Чкалов Р.В., Прокошев В.Г., Хорьков К.С. Воздействие лазерного излучения на поверхность твердого тела и формирование микро-и наноструктур // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2020. – Т. 84. № 3. – С. 443-446.
6. Вознесенская А.А., Иващенко А.В., Жданов А.В., Кочуев Д.А., Хорьков К.С. Синтез сферических гранул композиционного порошкового материала узкого гранулометрического состава для аддитивных технологий // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 3. – С. 25-29.

PARTICLE VELOCITY EVALUATION UNDER THE ACTION OF AN ELECTROSTATIC FIELD IN FEMTOSECOND LASER ABLATION PROCESS

R.V. Chkalov, *Assistant*

D.A. Kochuev, *Associate Professor*

D.G. Chkalova, *Senior Lecturer*

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs
(Russia, Vladimir)

***Abstract.** The article deals with the problems of femtosecond laser ablation process for synthesis of fine powders. It has been experimentally proven that the use of an electrostatic field during laser ablation can significantly reduce the absorption of laser radiation by ablated particles. The paper provides an analytical estimate of the rate of particles removal under the action of an electrostatic field by constructing a mathematical model of the process. The calculations confirm the experimental assumptions about the efficiency of the method.*

***Keywords:** femtosecond laser ablation, fine powder, electrostatic field.*