

А.А. Гальцов, Е.А. Ванина, Н.А. Леоненко

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С МИНЕРАЛЬНЫМИ СРЕДАМИ

*Object of researches is continuous laser radiation sources on the mineral samples, which contain gold, not extracted by gravitational methods and modeling the general laws of this process.*

Во многих современных технологиях обработки и модификации материалов используется лазерное излучение. Лазерные технологии обеспечивают высокую производительность и точность, позволяют экономить энергию и материалы, реализовывать принципиально новые технологические решения и использовать труднообрабатываемые материалы.

В основе лазерной обработки материалов лежит способность лазерного излучения создавать на малом участке поверхности высокие плотности теплового потока, достаточные для нагрева, плавления или испарения практически любого материала. Это связано с термическим эффектом поглощения излучения непрозрачными твердыми телами [1, 2].

В настоящее время одним из приоритетных направлений научно-исследовательских работ стал синтез наночастиц и наноматериалов путем нагрева конденсированных веществ с помощью лазерного излучения.

Цель работы состоит в изучении и математическом описании процессов, происходящих при лазерной обработке минеральных сред, содержащих тонкодисперсное золото. Объектом исследования являются минеральные среды, содержащие субмикронное и ультрадисперсное золото (образцы природных золотосодержащих глин, шлихов с субмикронным золотом, модельные образцы высокоглинистых песков с коллоидно-ионным золотом), не извлекаемое гравитационными методами. Предмет исследования – процессы агломерации золота, происходящие в зоне лазерного воздействия.

Для облучения исследуемых образцов использовался иттербиевый оптоволоконный источник непрерывного лазерного излучения ЛС-06. Оптические характеристики экспериментальной установки следующие: мощность после выходного коннектора – 600 Вт (в экспериментальной работе мощность задавалась от 60 до 300 Вт), режим работы непрерывный, частота модуляции выходной мощности – до 5 кГц, спектральная ширина – 4 нм, длина волны –  $\lambda = 1070$  нм, выходной коннектор IPG Laser, QВН-типа, 50 мкм [3].

Мишень, состоящая из исследуемой минеральной среды в россыпном виде (толщина слоя – 3 мм), помещалась на специальную графитовую подложку. Над графитовой подложкой размещалась оптическая головка, благодаря которой создавалась возможность задавать параметры расфокусированного излучения. Лазерное излучение, пройдя по иттербиевому оптоволокну, закрепленному на входе оптической головки, и через оптическую головку, размещенную вертикально и жестко закрепленную на штативе, попадало на исследуемые образцы. Движение подложки осуществлялось со скоростью 1 мм/с. Диаметр расфокусированного излучения подбирался эмпирически и составлял 7 мм.

Особенности строения структуры экспериментальных образцов до и после лазерного облучения исследовались с использованием сканирующей электронной микроскопии (растровый электронный микроскоп «LEO EVO 40HV»). На рис. 1 представлены электронные растровые изображения золотосодержащих высокоглинистых модельных образцов с коллоидно-ионным золотом.

Световой поток лазерного излучения, направленный на поверхность облучаемой минеральной среды, частично отражается от нее, а частично проходит в глубь исследуемого образца. Часть прошедшей энергии излучения тратится на нагревание и плавление мишени [2, 4].

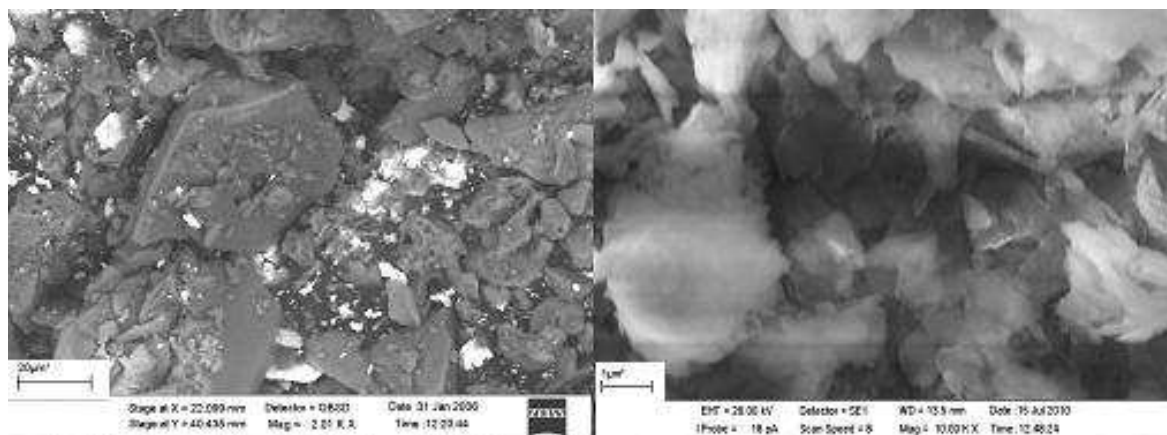


Рис. 1. Исходные модельные образцы высокоглинистых песков с коллоидно-ионным золотом до лазерной обработки.

На первом этапе происходит оплавление минеральных продуктов с низкой температурой плавления, образцы представляют собой поверхностно-неоднородные силикатные спеки, на которых образуются обожженные сфероподобные агломераты из глинистых, алюмосиликатных частиц.

При повышении температуры исследуемого образца происходит плавление частиц золота. При этом его ультрадисперсные частицы выступают в качестве поверхностно-активного вещества по отношению к уже расплавившейся массе сопутствующих минеральных продуктов. На поверхностях алюмосиликатных сфер происходит осаждение оплавленных частиц золота, причем размеры их намного превышают размеры частиц до лазерной обработки. Подробные результаты экспериментальных исследований приведены в работе [3].

На рис. 2 показаны электронные растровые изображения высокоглинистых золотосодержащих минеральных образцов после лазерной обработки с отмеченной областью энергодисперсионного анализа, доказывающей наличие золота.

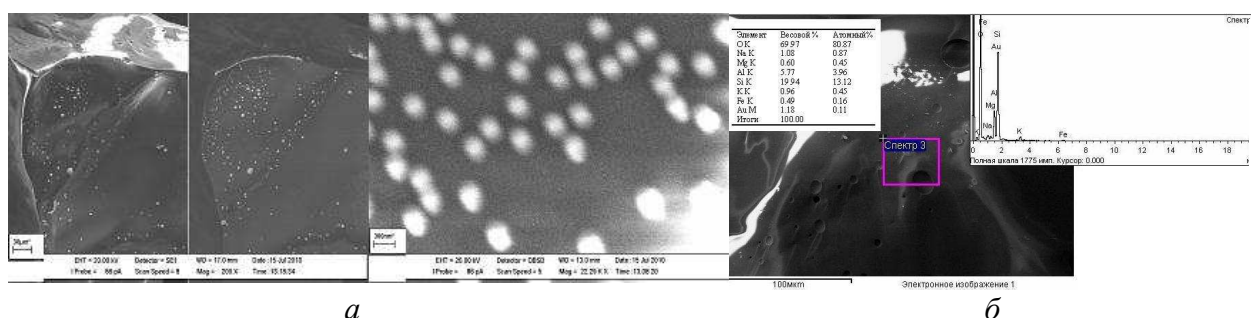


Рис. 2. Электронные растровые изображения высокоглинистых золотосодержащих минеральных образцов после лазерной обработки:

*a* – увеличение  $200\times$  и  $22000\times$  – светлополюсные сферические образования соответствуют агломерированному золоту размером 300 нм; *б* – отмечена область энергодисперсионного анализа, спектрограмма подтверждает наличие Au.

Успешная реализация процессов лазерной обработки материалов возможна только при условии формирования определенного профиля интенсивности излучения в заданной области на поверхности мишени. Наиболее эффективные режимы лазерной обработки материалов определяются только решением обратной задачи теплопроводности, когда по заданным известным

математической модели и температурному полю, а также входящим в основное уравнение теплопроводности коэффициентам определяется удельный энергетический поток через поверхность облучаемого материала [2, 4].

Такое математическое описание основывается на решении уравнения теплопроводности, записанного с учетом объемного источника энергии в виде закона Ламберта-Бэра для ослабления излучения в облучаемом образце [1, 4]:

$$I = (1 - R)I_0 \exp(-\alpha x), \quad (1)$$

где  $I_0$  – интенсивность падающего на мишень лазерного излучения;  $\alpha$  и  $R$  – коэффициенты поглощения и отражения материала мишени;  $x$  – расстояние от поверхности в глубину мишени.

Распределение температуры  $T(x, t)$  по глубине мишени рассчитывается по уравнению теплопроводности с объемным выделением энергии лазерного импульса [4]:

$$c_p \rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} - u(t) \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + (1 - R) \alpha I_0 \exp(-\alpha x), \quad (2)$$

где  $c_p$  – теплоемкость,  $\rho$  – массовая плотность материала мишени;  $\lambda$  – теплопроводность;  $u(t)$  – скорость движения поверхности вследствие испарения.

В модели используются следующие начальные и граничные условия:

$$T(x, t) = T_0, \quad (3)$$

$$\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) \Big|_{x=0} = L \rho u(t), \quad (4)$$

где  $T_0$  – начальная температура, однородная по всему объему мишени;  $L$  – теплота парообразования материала мишени.

Картины взаимодействия лазерного излучения с металлами (в данном случае – золото) и диэлектриками (алюмосиликаты) существенно различаются.

В металлах лазерное излучение поглощается электронами проводимости. Поглощенная энергия быстро, за несколько фемтосекунд, распределяется между электронами и затем медленно преобразуется в энергию колебаний решетки. Последний процесс контролируется силой электрон-фононного взаимодействия и может занимать время от долей пикосекунды до нескольких десятков пикосекунд. В итоге между электронами и фононами устанавливается тепловое равновесие, и для описания распространения тепла в глубину облученного образца можно использовать обычную модель теплопроводности (уравнение 2) [4, 5].

У диэлектриков с большой энергетической щелью в начале лазерного воздействия отсутствует поглощение излучения за счет обратного тормозного рассеяния. Таким образом, большинство диэлектриков при относительно умеренных интенсивностях лазерного излучения можно считать прозрачными. При достижении пороговой интенсивности, зависящей от свойств конкретного материала, начинается нарушение структуры диэлектрика, выражающееся в изменении коэффициентов отражения и поглощения, с последующим плавлением поверхности.

На начальной стадии лазерного воздействия происходит генерация свободных электронов вследствие многофотонного механизма. Свободные электроны эффективно поглощают энергию лазерного излучения за счет обратного тормозного рассеяния, в результате чего развивается процесс лавинной ионизации. Появление большого количества электронов в зоне проводимости приводит к металлизации поверхностного слоя диэлектрика, что выражается в увеличении коэффициентов поглощения и отражения. Далее электрон-решеточная релаксация может быть описана по аналогии с ее описанием для металлов. Однако в отличие от металлов плотность электронов в зоне проводимости диэлектриков сильно зависит от времени и расстояния в глубину мишени. По окончании лазерного импульса с течением времени происходят рекомбинация

(захват) электронов в связанное состояние и оже-рекомбинация, что приводит к постепенному возвращению мишени свойств диэлектрика [4, 5].

Для описания динамики нагрева диэлектрика используют следующую форму уравнения теплопроводности, с учетом всех каналов баланса лазерной энергии в облучаемом образце [4]:

$$c_p \rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{J}{en_e} \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \Sigma(x, t), \quad (5)$$

где  $J$  – ток электронов;  $\lambda$  – теплопроводность;  $e$  – заряд электрона;  $n_e$  – концентрация электронов;  $\Sigma(x, t)$  – описывает поглощение излучения в образце, выбирается таким образом, чтобы учесть все возможные каналы поглощения лазерной энергии.

Ток электронов может быть представлен в виде суммы дрейфового и диффузионного членов:

$$J = -en_e \mu E - eD \nabla n_e, \quad (6)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии электронов.

Таким образом, нами в данной работе рассмотрены физические процессы, протекающие при взаимодействии лазерного излучения с минеральными средами и приводящие к образованию агломератов золота. Рассмотрено математическое представление этих процессов. Совместное решение уравнений теплопроводности для компонентов, входящих в состав дисперсных сред, дает возможность определить оптимальные условия процесса облучения, что позволяет варьировать размеры частиц золота, образующихся в результате лазерной обработки.

---

1. Вейко В.П. Опорный конспект лекций по курсу «Физико-технические основы лазерных технологий». Раздел: Технологические лазеры и лазерное излучение // СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. – 52 с.

2. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок // под ред. В.Я. Панченко. – М.: Физматлит, 2009. – 664 с.

3. Леоненко Н.А., Ванина Е.А., Гальцов А.А., Капустина Г.Г., Швец Н.Л. Воздействие лазерного излучения на золотосодержащие дисперсные среды и моделирование температурного поля процесса лазерной агломерации // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: Изд-во ОрелГТУ, 2010. № 5-2. – С. 83-91.

4. Синтез наноразмерных материалов при воздействии мощных потоков энергии на вещество / Л.В. Булгаков, Н.М. Булгакова, И.М. Бураков и др. – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2009. – 462 с.

5. Гришаев Р.В., Мирзаде Ф.Х., Хоменко М.Д. Численное моделирование нагрева и плавления микрочастицы лазерным излучением // Журнал техн. физики. – Т. 75, вып. 12. – 2005. – С. 124-143.