



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 681.78

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.019



ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГОРЕНИЯ НАНОПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО И НЕПРЕРЫВНОГО ЛАЗЕРОВ ПОДСВЕТКИ

Федор Александрович Губарев

Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия
FAGubarev@sevsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7499-6109>

Аннотация. Работа посвящена развитию метода скоростной визуализации процессов высокотемпературного горения с использованием лазерной подсветки. Объектом визуализации выбран образец нанопорошка алюминия, горение которого протекает при температуре, достигающей 2500 К, и сопровождается ярким свечением, которое изменяется в широком диапазоне в процессе горения. Показано, что лазерная подсветка расширяет возможности скоростной системы визуализации и позволяет более детально исследовать поверхность образцов по сравнению с пассивной визуализацией путем установки нейтрального или полосового светофильтров перед объективом скоростной камеры. Рассмотрены различные варианты визуализации в собственном свечении с установкой светофильтров с различным пропусканием. Для мониторинга поверхности горящего материала скоростной видеокamerой в широком диапазоне температур объекта предложено использовать подсветку малой мощности от непрерывного твердотельного лазера или импульсного лазера, а также расширитель пучка для равномерного освещения поверхности. Проведено сравнение результатов визуализации с использованием подсветки от твердотельного лазера с длиной волны 532 нм и лазера на парах бромида меди с длиной волны 510,6 нм. Показано, что мощности излучения твердотельного лазера 200 мВт при диаметре области подсветки 20 мм достаточно для визуализации «сквозь пламя» поверхности горящего нанопорошка алюминия на низкотемпературной стадии горения до температур ~1950К, при этом равномерность освещения поверхности может обеспечиваться как за счет применения диффузора, расположенного непосредственно вблизи образца, так и с применением телескопического расширителя пучка. Теоретические оценки и результаты эксперимента показали, что мощности излучения 200 мВт вне зависимости от типа лазера недостаточно для визуализации поверхности горящего нанопорошка алюминия на высокотемпературной стадии горения. Возможность полного подавления засветки при горении с температурой выше 2500 К появляется при использовании лазера подсветки со средней мощностью > 3,35 Вт. Предложенная техника подсветки на основе твердотельного лазера имеет преимущества по надежности и простоте по сравнению с известными системами на основе лазера на парах меди или бромида меди.

Ключевые слова: скоростная визуализация, лазерная подсветка, высокотемпературное горение, нанопорошок алюминия, фоновая засветка.

Благодарности: автор выражает признательность сотрудникам Томского политехнического университета (г. Томск) за предоставленную техническую возможность проведения экспериментального исследования.

Для цитирования: Губарев Ф. А. Визуализация горения нанопорошков металлов с применением импульсного и непрерывного лазеров подсветки // Ползуновский вестник. 2022. № 4. Т. 2. С. 151–158. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.019. EDN: <https://elibrary.ru/QKMHCE>.

METAL NANOPOWDERS COMBUSTION IMAGING USING ILLUMINATION FROM PULSED AND CONTINUOUS WAVE LASERS

Fedor A. Gubarev

Sevastopol State University, Sevastopol, Russia
FAGubarev@sevsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7499-6109>

Abstract. *The work is devoted to the development of the method for high-speed imaging of high-temperature combustion processes using laser illumination. The object of visualization was a sample of aluminum nanopowder, which combustion temperature reaches 2500 K and is accompanied by a bright glow that varies in a wide range during combustion. It is demonstrated that laser illumination expands the capabilities of a high-speed imaging system and allows a more detailed study of the surface of samples compared to passive imaging by installing a neutral or band-pass filter in front of the high-speed camera lens. Various options for imaging with the installation of light filters with different transmission are considered. To monitor the surface of a burning material with a high-speed video camera in a wide temperature range of an object, it is proposed to use a low-power illumination from a continuous wave solid-state laser or a pulsed laser, as well as a beam expander for uniform illumination of the surface. The results of imaging using illumination from a solid-state laser with a wavelength of 532 nm and a copper bromide vapor laser with a wavelength of 510.6 nm are compared. It is shown that the output power of a solid-state laser of 200 mW with an illumination area diameter of 20 mm is sufficient to visualize "through the flame" the surface of a burning aluminum nanopowder at a low-temperature stage of combustion up to temperatures of ~1950 K. The uniform illumination of the surface can be ensured both by using a diffuser located directly near the sample, and with the use of a telescopic beam expander. Theoretical estimates and experimental results demonstrate that the illumination average power of 200 mW, regardless of the type of laser, is not enough to visualize the surface of a burning aluminum nanopowder at the high-temperature stage. The possibility of complete suppression of illumination during combustion with a temperature above 2500 K will appear when using an illumination laser with an average power of > 3,35 W. The proposed illumination technique based on a solid-state laser has advantages in terms of reliability and simplicity compared to known systems based on copper or copper bromide vapor lasers.*

Keywords: *high-speed imaging, laser illumination, high-temperature combustion, aluminum nanopowder, background illumination.*

Acknowledgements: *the author expresses his gratitude to the staff of the Tomsk Polytechnic University (Tomsk) for providing the technical opportunity to conduct an experimental study.*

For citation: Gubarev, F. A. (2022). Metal nanopowders combustion imaging using illumination from pulsed and continuous wave lasers. *Polzunovskiy vestnik*, 4(2), 151-158. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.019. EDN: <https://elibrary.ru/QKMHCE>.

ВВЕДЕНИЕ

Горение высокоэнергетических материалов протекает при высокой температуре и сопровождается ярким широкополосным излучением [1, 2]. Исследование горения высокоэнергетических материалов, в частности нанопорошков металлов, возможно, как путем регистрации и анализа собственного излучения, так и путем анализа зондирующего излучения (например, лазерного излучения), отраженного от поверхности объекта. Собственное свечение характеризует, в целом, температуру и интенсивность свечения. Бо-

лее высокой спектральной яркости соответствует более высокая температура объекта. Оценка интегральной яркости дает информацию об интенсивности процесса, включая повышение температуры и увеличение области объекта, охваченной горением [1–3]. При этом поверхность материала экранирована светящимся слоем плазмы и не доступна для наблюдения.

Информацию о поверхности под светящимся слоем плазмы возможно получить с использованием лазерной подсветки [4–7]. В этом случае отраженный от поверхности объекта свет дает информацию об отражаю-

щей способности поверхности, которая изменяется в ходе горения [8]. В результате изменения оптических свойств материала, шероховатости поверхности, фазового (образование жидкой или газовой фазы) или химического состава веществ на поверхности происходит изменение интенсивности отраженного света. Лазерная подсветка [4–7], как и лазерный мониторинг [6–9], дают уникальную возможность исследования морфологии поверхности горящих высокоэнергетических материалов «сквозь пламя».

В литературе известен метод исследования горения высокоэнергетических порошковых материалов с применением лазерной подсветки от импульсного лазера на парах меди [4,5] или бромида меди [6]. В работе нашего коллектива [9] показано, что лазерная подсветка может использоваться совместно с лазерным мониторингом на основе усиления яркости. В этом случае в качестве источника лазерной подсветки выступает усиленное спонтанное излучение усилителя яркости. Следует отметить, что лазерные системы с усилением яркости требуют не только наличия системы синхронизации работы лазера и скоростной камеры, но и отличаются малым сроком службы активных элементов и повышенной опасностью обслуживания (высокая температура, высокие напряжения, газовая среда) [10, 11]. В случаях, когда для задач эксперимента не требуется микроскопическое увеличение и узкополосная фильтрация излучения на уровне пикометров, предпочтение при выборе техники эксперимента может быть отдано более простой и надежной реализации с высоким сроком службы. В частности, в работе [12] для визуализации потоков частиц в совокупности со скоростной камерой использовалась подсветка от непрерывного 532 нм твердотельного лазера мощностью до 6 W.

В работе [7] нами применялась лазерная подсветка от твердотельного лазера с длиной волны 532 нм. Для равномерного освещения поверхности устанавливался диффузор. Недостатками методики являлись высокий спекл-контраст изображений и непосредственная близость диффузора к горящему объекту.

Целью настоящей работы является развитие метода скоростной визуализации процессов горения на основе лазерной подсветки с применением относительно недорогого коммерчески доступного твердотельного лазера малой мощности (200 мВт, 532 нм) и телескопического расширителя пучка.

МЕТОДЫ

В качестве объекта наблюдения использовался нанопорошок алюминия, полученный методом электрического взрыва проводника [13, 14], с распределением частиц по размерам, близким к логнормальному с максимумом 120 нм. Содержание металлических примесей в порошке не превышало 0,2 мас. %. Образцы формировались путем компактирования. Размер образцов составлял $20 \times 5 \times 3$ мм³ при массе 0,5 г. Образец размещался на алюминиевой подложке. Иницирование горения осуществлялось открытым огнем (спичкой) или лазерным излучением.

Для визуализации процесса горения использовались методы на основе скоростной видеорегистрации с применением фильтрации излучения нейтральными и полосовыми светофильтрами и с применением лазерной подсветки. Использовались нейтральные фильтры типа НС на основе цветных стекол [15]. Полосовые фильтры (ПФ) на длинах волн 510 и 532 нм имели ширину полосы пропускания 10 нм [16]. В ходе выполнения исследований, представленных в данной работе, использовалась скоростная цифровая камера Phantom MiRo S110. Скорость съемки составляла 500 кадров/с. Изображение формировалось макрообъективом Canon Macro Lens EF 180 mm. Во всех экспериментах расстояние от объекта до объектива составляло 50 см.

Схемы визуализации приведены на рисунке 1. В данной работе использовались компактный непрерывный твердотельный лазер LS-1-LN-532-200 производства ООО «Лас» мощностью излучения 200 мВт на длине волны 532 нм [17] и импульсный лазер на парах бромида меди собственного производства с диаметром газоразрядной трубки 1,5 см и длиной 40 см [18]. Пучок излучения твердотельного лазера диаметром ~2 мм расширялся в диапазоне 2х-12х с использованием расширителя пучка Standa 10BE03-2-12. Таким образом, диаметр пятна на объекте мог варьироваться до 24 мм, и было возможно осветить всю поверхность образца без установки диффузора (рисунок 1, б). Тем не менее, с целью сравнения качества изображений также проводились эксперименты с диффузором и расширителем пучка (рисунок 1, а). По сравнению со схемой, использованной в работе [7] нашего коллектива, в схеме на рисунке 1, а излучение твердотельного лазера расширялось до диаметра ~10 мм, после чего рассеивалось диффузором. Расширитель пучка использовался для снижения спекл-контраста. Недостатком схемы является расположение диффузора вблизи образца, что приводит к его быстрому загрязнению продуктами сгорания.

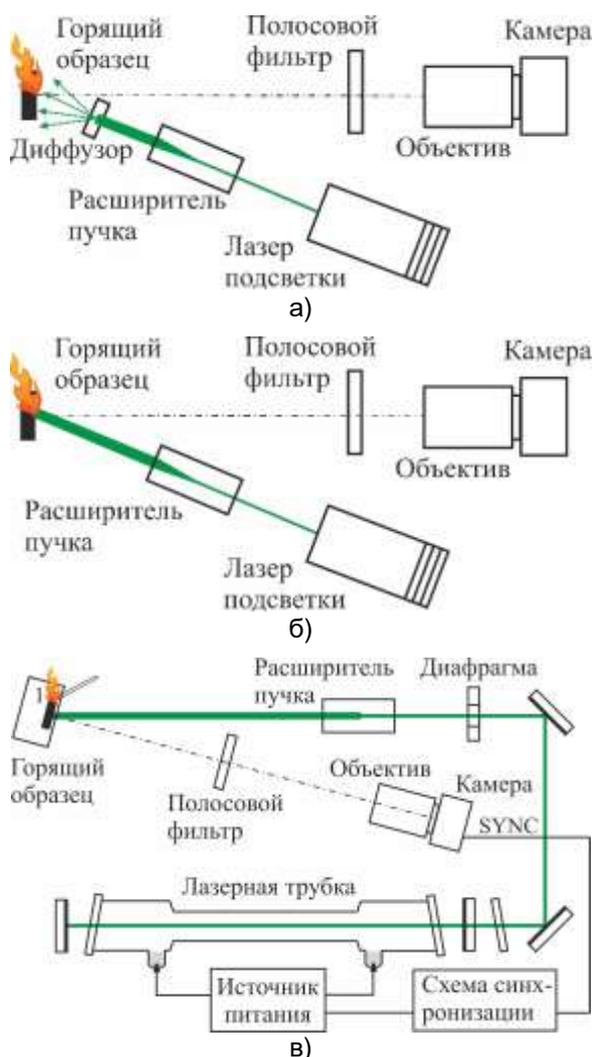


Рисунок 1 – Схемы визуализации: а – схема освещения с твердотельным лазером, расширителем пучка и диффузором; б – схема освещения с твердотельным лазером и расширителем пучка; в – схема освещения с CuBr-лазером и расширителем пучка

Figure 1 - Visualization schemes: a - lighting scheme with solid-state laser, beam expander and diffuser; b - lighting scheme with solid-state laser and beam expander; c - lighting scheme with CuBr laser and beam expander

При использовании лазера на парах брома меди на пути излучения устанавливалась диафрагма диаметром 6 мм, которая отсекала боковые части диаграммы радиального распределения. Средняя мощность излучения после диафрагмы составляла 200 мВт или 380 мВт на длине волны 510,6 нм. Мощность уменьшалась путем установки нейтрального светофильтра на пути излучения. Режим работы CuBr-лазера подобран таким образом, чтобы излучение на

длине волны 578,2 нм отсутствовало [18]. Расширитель пучка обеспечивал освещение всей поверхности объекта наблюдения (рисунок 1, в). Применение CuBr-лазера требует синхронизации работы лазера и скоростной камеры, чтобы обеспечить лазерную подсветку во время открытия затвора камеры. При использовании непрерывного лазера синхронизация не требуется. Таким образом, схема визуализации с использованием твердотельного лазера существенно проще схемы с использованием лазера на парах брома меди (или высокотемпературного лазера на парах меди).

Метод скоростной визуализации с лазерной подсветкой основан на высокой спектральной яркости излучения лазера. При мощности излучения 200 мВт и диаметре пучка 20 мм, плотность мощности, освещающей объект наблюдения составляет 0,64 мВт/мм². Для использованного нанопорошка алюминия коэффициент диффузного отражения, измеренный спектрофотометром СФ-256, составляет 12,47 % на длине волны 530 нм. Таким образом, отраженная мощность излучения твердотельного лазера подсветки с длиной волны 532 нм составляет ~80 мкВт/мм².

Допустим, что излучение горящего нанопорошка алюминия подчиняется закону излучения абсолютно черного тела, нагретого до температуры T . Тогда спектральная плотность мощности, излучаемая объектом в спектральном диапазоне $\Delta\lambda$ твердотельного лазера (0,1 нм), рассчитанная по формуле Планка

$$R_{\lambda}(T) = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda \cdot kT}} - 1} \cdot \Delta\lambda, \quad (1)$$

равна 17,3 мкВт/мм² для $T = 2500$ К. Для $T = 800$ К, соответствующей низкотемпературной стадии горения [1] $R_{\lambda} = 1,7 \cdot 10^{-9}$ мкВт/мм². Для излучения CuBr-лазера, имеющего длину волны 510,6 нм и ширину линии излучения ~2 пм [10, 11], спектральная плотность мощности засветки составляет 0,268 мкВт/мм² и $9,9 \cdot 10^{-12}$ мкВт/мм² для $T = 2500$ К и $T = 800$ К соответственно.

При использовании полосовых фильтров с $\Delta\lambda = 10$ нм, величина засветки составит 1,34 мВт/мм² и $4,9 \cdot 10^{-8}$ мкВт/мм² для $T = 2500$ К и $T = 800$ К соответственно, для полосы пропускания 510 ± 5 нм. Для полосы 532 ± 5 нм значения составят 1,73 мВт/мм² и $1,7 \cdot 10^{-7}$ мкВт/мм² для $T = 2500$ К и $T = 800$ К соответственно. При средней мощности подсветки 200 мВт плотность мощности излучения засветки будет меньше плотности мощности отраженного от

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГОРЕНИЯ НАНОПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО И НЕПРЕРЫВНОГО ЛАЗЕРОВ ПОДСВЕТКИ

поверхности лазерного излучения до температур поверхности 1950–2000 К. Таким образом, влияние засветки на изображение, формируемое отраженным излучением лазерной подсветки, возможно практически полностью исключить на низкотемпературной стадии горения. На высокотемпературной стадии горения, несмотря на более высокую спектральную яркость лазера подсветки, засветка в условиях эксперимента будет присутствовать.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Наиболее простым способом скоростной визуализации процесса горения является прямое наблюдение, при котором засветка камеры снижается путем установки нейтральных или полосовых светофильтров перед объективом. На рисунке 2 приведены примеры визуализации горения нанопорошка алюминия с различными светофильтрами, установленными перед объективом камеры. Инициирование горения осуществлялось лазерным излучением с длиной волны 660 нм, мощностью 2 Вт в непрерывном режиме, длительностью импульса 0,3 с. Как следует из представленных изображений, пассивная прямая видеорегистрация при соответствующем подборе светофильтров дает возможность исследовать распространение стадий горения по поверхности образца, при этом невозможно наблюдать низкотемпературную стадию горения при условиях, когда видна поверхность во время высокотемпературной стадии горения (в, д). Соответственно, при условиях, когда видна низкотемпературная стадия горения (б, г), поверхность в области высокотемпературного горения значительно засвечена.

На рисунке 3, а приведены изображения горящего образца нанопорошка алюминия, полученные с лазерной подсветкой от твердотельного лазера (рисунок 1, б) с установленным полосовым фильтром 532 нм и нейтральным НС-1. Экспозиция камеры составляла 500 мкс. Время указано от начала записи, примерно соответствует моменту инициирования. Такая конфигурация схемы наблюдения позволяет полностью подавить фоновую засветку на низкотемпературной стадии горения, однако на высокотемпературной стадии горения засветка присутствует. Кроме того, светофильтр не полностью подавляет излучение в желто-оранжевой области. В отличие от пассивной фильтрации, лазерная подсветка дает более высокую детализацию поверхности. На рисунке 3, б приведены результаты визуализации с установлен-

POLZUNOVSKIY VESTNIK № 4, V.2 2022

ным диффузором (НС-1 не устанавливался). Визуально качество изображений отличается незначительно. Установка диффузора приводит к незначительному повышению шума.

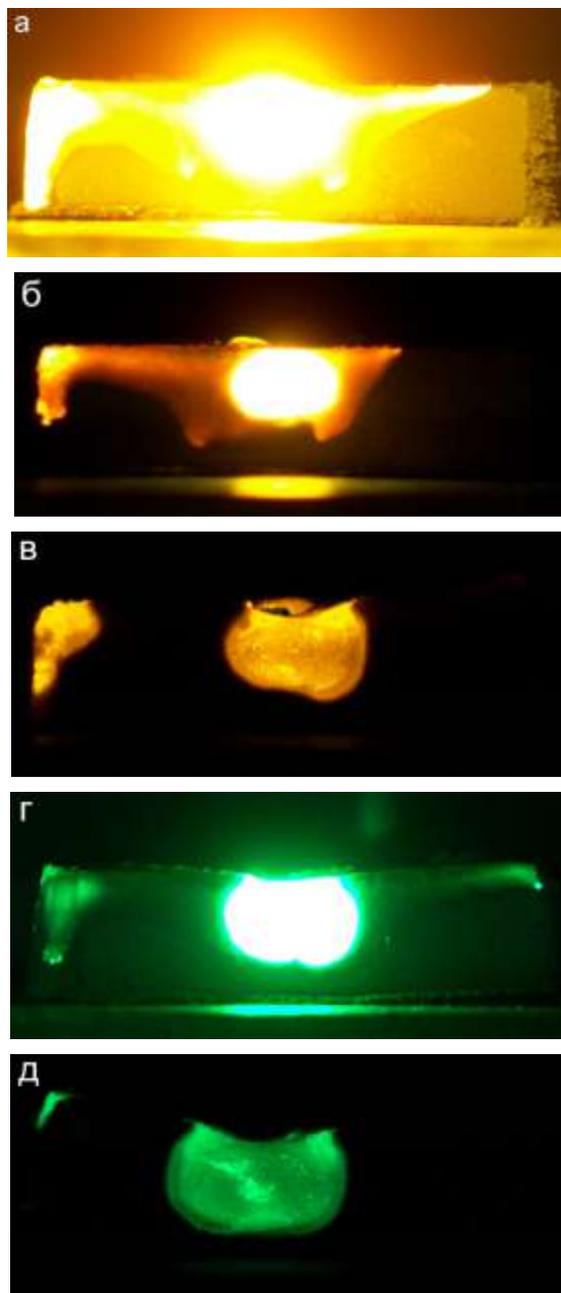


Рисунок 2 – Визуализация горения образцов нанопорошка алюминия путем прямой съемки: а – без светофильтров; б – НС-3; в – НС-3 и НС-13; г – ПФ 510±5 нм; д – ПФ 510±5 нм и НС-10

Figure 2 - Visualization of gorenje samples of aluminum nanopowder by direct removal: a - without light filters; b - NS-3; b - NS-3 and NS-13; g - PF 510 ± 5 nm; d - PF 510 ± 5 nm and NS-10

Системы визуализации с импульсной лазерной подсветкой от лазера на парах меди

(бромиды меди), несмотря на возможность визуализации поверхности «сквозь пламя», используются лишь несколькими научными группами [4–7]. По нашему мнению, это обусловлено высокой стоимостью и сложностью эксплуатации данных лазерных систем. Результаты визуализации горения нанопорошка алюминия с использованием схемы на рисунке 1, в приведены на рисунке 4. Рассмотрены два варианта: мощность подсветки 200 мВт, экспозиции камеры 500 мкс; мощность подсветки 380 мВт, экспозиция 250 мкс. Перед объективом камеры устанавливался полосовой фильтр 510 нм и нейтральный НС-1.

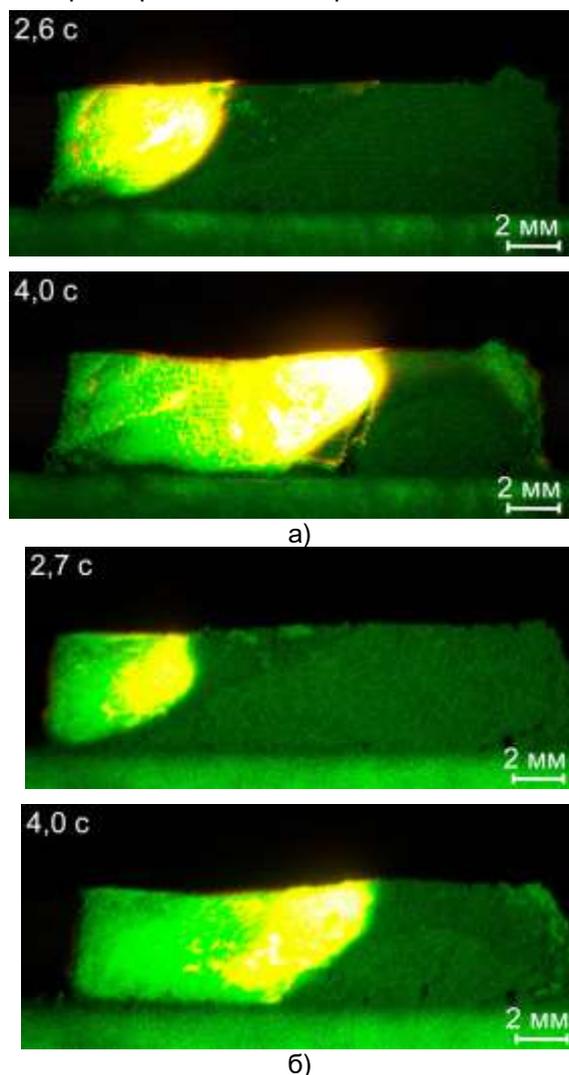


Рисунок 3 – Визуализация горения нанопорошка алюминия с использованием подсветки от твердотельного лазера: а – без диффузора; б – установлен диффузор

Figure 3 - Visualization of gorenjenano-powder aluminum using a solid-state laser illumination: a - without a diffuser, b - a diffuser is installed

Как показывают результаты визуализации, применение импульсной лазерной под-

светки малой мощности при экспозиции 500 мкс не позволяет полностью подавить засветку, создаваемую высокотемпературной волной горения. Таким образом, как при непрерывной, так и импульсной подсветке средней мощности подсветки 200 мВт недостаточно для полного подавления засветки, создаваемой горящим образцом.

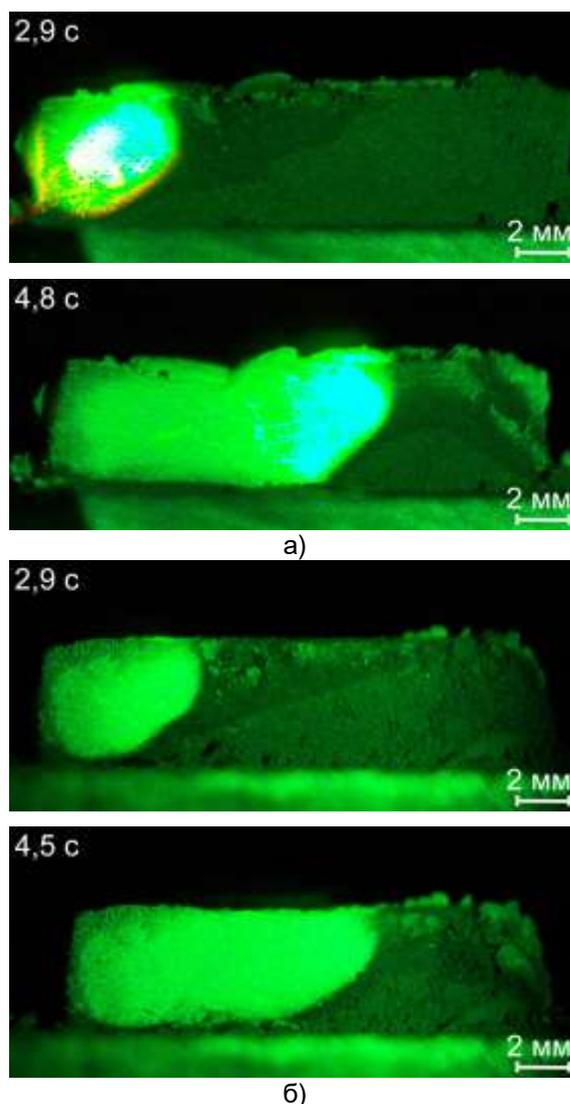


Рисунок 4 – Визуализация горения нанопорошка алюминия с использованием подсветки от CuBr-лазера: а – мощность подсветки 200 мВт, экспозиция камеры 500 мкс; б – мощность подсветки 380 мВт, экспозиция камеры 250 мкс

Figure 4 - Visualization of gorenjenano-powder aluminum using illumination from CuBr laser: a - illumination power 200 MW, camera exposure 500 microseconds; b - illumination power 380 MW, camera exposure 250 microseconds

Уменьшение экспозиции с одновременным повышением мощности подсветки поз-

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГОРЕНИЯ НАНОПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО И НЕПРЕРЫВНОГО ЛАЗЕРОВ ПОДСВЕТКИ

волило практически полностью подавить влияние широкополосной засветки, создаваемой горящим образцом (рисунок 4, б). Тем не менее, остается излучение засветки в области пропускания полосового фильтра, которое приводит к нечеткости изображения на высокотемпературной стадии горения. Дальнейшее уменьшение экспозиции, также как и установка НС-фильтров с меньшим пропусканием, потребует увеличения мощности подсветки для обеспечения достаточной освещенности поверхности объекта. Оценки по формуле (1) для ширины полосового фильтра 10 нм дают величину мощности лазерной подсветки 3,35 Вт, обеспечивающую превышение уровня плотности мощности подсветки над уровнем засветки, создаваемой образцом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрено практическое использование различных вариантов скоростной визуализации горения нанопорошков металлов с применением непрерывного твердотельного лазера (532 нм) и импульсного CuBr-лазера (510 нм). Преимуществом использования для лазерной подсветки бюджетного непрерывного твердотельного лазера невысокой мощностью излучения (200 мВт) является простота эксплуатации и отсутствие синхронизации со скоростной камерой. При одинаковом уровне средней мощности применение непрерывной подсветки от твердотельного лазера дает результат, аналогичный применению импульсной подсветки от газового CuBr-лазера.

Использование лазерной подсветки обеспечивает более детализированное изображение поверхности по сравнению с узкополосной пассивной фильтрацией. Применение телескопического расширителя пучка, расположенного на значительном расстоянии от горящего образца дает возможность освещать значительную площадь поверхности без применения диффузора, размещаемого вблизи образца.

Лазерная подсветка с плотностью мощности ~ 80 мВт/мм² позволяет подавить засветку, создаваемую горящим нанопорошком алюминия на низкотемпературной стадии горения даже при значительной ширине полосы пропускания полосового фильтра (10 нм). Сопоставление результатов визуализации с теоретическими оценками уровня засветки показало, что для полного подавления засветки, создаваемой объектом с температурой 2500 К, необходимо использовать лазер с мощностью $> 3,35$ Вт или полосовой фильтр с

меньшей шириной полосы пропускания.

Перспективным развитием техники визуализации, рассмотренной в данной работе, является применение импульсного твердотельного лазера с внешней синхронизацией от скоростной камеры. В этом случае воздействие на объект визуализации будет меньше по сравнению с непрерывным лазером подсветки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горение нанопорошков металлов / А.А. Громов [и др.]. – Томск : Дельтаплан, 2008. – 382 с.
2. Zarko, V.E., Gromov, A.A. *Energetic Nanomaterials: Synthesis, Characterization and Application*. Amsterdam : Elsevier, 2016. – 374 p.
3. Проблемы диагностики нанопорошков и наноматериалов / А.П. Ильин [и др.]. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 250 с.
4. Plantier, K.B., Pantoya, M.L., Gash A.E., *Combustion wave speeds of nanocomposite Al/Fe₂O₃: the effects of Fe₂O₃ particle synthesis technique // Combustion and Flame*. – 2005. – Vol. 140. – P. 299–309. DOI: 10.1016/j.combustflame.2004.10.009.
5. Peering through the flames: imaging techniques for reacting aluminum powders / E.T. Zepher [и др.] // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56. – № 9. – P. 2535–2541. DOI: 10.1364/AO.56.002535.
6. Визуализация процесса СВС с использованием активных сред CuBr-лазеров / М.В. Тригуб [и др.] // *Ползуновский вестник*. – 2012. – № 2/1. – С. 181–184.
7. High-speed visualization of nanopowder combustion in air / F.A. Gubarev [и др.] // *Optica Pura y Aplicada*. – 2018. – Vol. 51. – № 4. – P. 1–7. DOI: 10.7149/OPA.51.4.51003.
8. Study of self-propagating high-temperature synthesis of aluminium nitride using a laser monitor / L. Li [и др.] // *Ceramics International*. – 2018. – Vol. 44. – № 16. – P. 19800–10808. DOI: 1980810.1016/j.ceramint.2018.07.237.
9. Two-brightness-Amplifier imaging system for energetic-materials-combustion study / F.A. Gubarev [и др.] // *Review of Scientific Instruments*. – 2021. – Vol. 92. – № 5. – Art. – №. 053702. DOI: 10.1063/5.004016.
10. Солдатов, А.Н., Соломонов, В.И. Газо-разрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. – Новосибирск : Наука, 1985. – 152 с. – 57.
11. Скоростные усилители яркости на индуцированных переходах в парах металлов / Г.С. Евтушенко [и др.]. – Томск : STT, 2016. – 246 с.
12. Guldenbecher, D.R., Cooper, M.A., Sojka, P.E. High-speed (20 kHz) digital in-line holography for transient particle tracking and sizing in multiphase flows // *Applied Optics*. – 2016. – Vol. 55. – № 11. – P. 2892–2903. DOI: 10.1364/AO.55.002892.
13. Ильин, А.П. Развитие электровзрывной технологии получения нанопорошков в НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете // *Известия Томского политехнического университета*. – 2003. – Т. 306. – № 1. – С. 133–139.
14. Ilyin, A.P., Nazarenko, O.B., Tikhonov, D.V. *Synthesis and characterization of metal carbides*

nanoparticles produced by electrical explosion of wires // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. – 2012. – Vol. 12. – № 10. – P. 8137–8142. DOI: 10.1166/jnn.2012.4515.

15. Цветное оптическое стекло и особые стекла / под ред. Г.Т. Петровского. – Москва : Дом оптики, 1990. – 228 с.

16. ООО «Фотооптик». – URL: <https://photooptic-filters.com> (дата обращения: 07.10.2022).

17. ООО "Лас". – URL: <https://lascompany.ru>. (дата обращения: 07.10.2022).

18. Li, L., Shiyanov, D.V., Gubarev, F.A. Spatial-temporal radiation distribution in a CuBr vapor brightness amplifier in a real laser monitor scheme // *Applied Physics B: Lasers and Optics*. – 2020. – Vol. 126. – № 10. Art. No 155. DOI: 10.1007/s00340-020-07511-7.

Информация об авторах

Ф. А. Губарев – доктор технических наук, профессор кафедры «Паротурбинные установки» Севастопольского государственного университета.

REFERENCES

1. Gromov, A.A., Khabas, T.A., Ilyin, A.P., Popenko, E.M., Korotkiy, A.G., Arkhipov, V.A., Ditz, A.A., Strokova, Y.I. & Tolbanova, L.O. (2008). Metal nanopowders combustion. Tomsk: Deltaplan (In Russ.).

2. Zarko, V.E. & Gromov, A.A. (2016). Energetic Nanomaterials: Synthesis, Characterization and Application. Amsterdam: Elsevier.

3. Ilyin, A.P., Korshunov, A.V., Perevezentzeva, D.O. & Tolbanova, L.O. (2010). Problems of diagnostics of nanopowders and nanomaterials. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House. (In Russ.).

4. Plantier, K.B., Pantoya, M.L. & Gash, A.E. (2005). Combustion wave speeds of nanocomposite Al/Fe₂O₃: the effects of Fe₂O₃ particle synthesis technique. *Combustion and Flame*, (4), 299-309. DOI: 10.1016/j.combustflame.2004.10.009.

5. Zepper, E.T., Pantoya, M.L., Bhattacharya, S., Marston, J.O., Neuber, A.A. & Heaps, R.J. (2017). Peering through the flames: imaging techniques for reacting aluminum powders. *Applied Optics*, (9), 2535-2541. DOI: 10.1364/AO.56.002535.

6. Trigub, M.V., Evtushenko, G.S., Kiryashkin, A.I., Kitler, V.D., Yusupov, P.A., Gubarev, F.A., Torgaev, S.N. & Shiyanov, D.V. (2012). Visualization of the SHS process using active media of CuBr lasers. *Polzunovskiy vestnik*, (2/1), 181-184. (In Russ.).

7. Gubarev, F.A., Klenovskii, M.S., Li, L.,

Mostovshchikov, A.V. & Ilyin, A.P. (2018). High-speed visualization of nanopowder combustion in air. *Optica Pura y Aplicada*, (4), 1-7. DOI: 10.7149/OPA.51.4.51003.

8. Li, L., Ilyin, A.P., Gubarev, F.A., Mostovshchikov, A.V. & Klenovskii, M.S. (2018). Study of self-propagating high-temperature synthesis of aluminium nitride using a laser monitor. *Ceramics International*, 2018, (16), 19800-10808. DOI: 1980810.1016/j.ceramint.2018.07.237.

9. Gubarev, F.A., Moldabekov, A.S., Mostovshchikov, A.V. & Li, L. (2021). Two-brightness-Amplifier imaging system for energetic-materials-combustion study. *Review of Scientific Instruments*, (5), 053702. DOI: 10.1063/5.004016.

10. Soldatov, A.N. & Solomonov, V.I. (1985). Gas-discharge lasers based on self-terminating transitions in metal vapors. Novosibirsk: Nauka (In Russ.).

11. Evtushenko, G.S., Kazaryan, M.A., Torgaev, S.N., Trigub, M.V. & Shiyanov, D.V. (2016). High-speed brightness amplifiers based on induced transitions in metal vapors. Tomsk: STT. (In Russ.).

12. Gueldenbecher, D.R., Cooper, M.A. & Sojka, P.E. (2016). High-speed (20 kHz) digital in-line holography for transient particle tracking and sizing in multiphase flows. *Applied Optics*, (11), 2892-2903. DOI: 10.1364/AO.55.002892.

13. Ilyin, A.P. Development of electroexplosive technology for obtaining nanopowders at the High Voltage Research Institute at Tomsk Polytechnic University (2003). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, (1), 133-139. (In Russ.).

14. Ilyin, A.P., Nazaren, O.B. & Tikhonov, D.V. (2012). Synthesis and characterization of metal carbides nanoparticles produced by electrical explosion of wires. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, (10) 8137-8142. DOI: 10.1166/jnn.2012.4515.

15. Petrovskiy, G.T. (Ed.) (1990). Colored optical glass and special glasses. Moscow: Dom Optiki. (In Russ.).

16. Sait the company LLC "Las". Retrieved from <https://lascompany.ru>. (In Russ.).

17. Sait the company LLC "Photoptic". Retrieved from <https://photoptic-filters.com> (In Russ.).

18. Li, L., Shiyanov, D.V. & Gubarev, F.A. (2020). Spatial-temporal radiation distribution in a CuBr vapor brightness amplifier in a real laser monitor scheme. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, (10), 155. DOI: 10.1007/s00340-020-07511-7.

Information about the authors

F. A. Gubarev - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Steam Turbines of Sevastopol State University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 10.10.2022; одобрена после рецензирования 30.11.2022; принята к публикации 15.12.2022.

The article was received by the editorial board on 10 Oct 2022; approved after editing on 30 Nov 2022; accepted for publication on 15 Dec 2022.