

УДК 621.373.8

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СВС, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКТИВНЫХ СРЕД СВВР-ЛАЗЕРОВ

М.В. Тригуб, Г.С. Евтушенко, А.И. Кирдяшкин, В.Д. Китлер, Р.А. Юсупов, Ф.А. Губарев, С.Н. Торгаев, Д.В. Шиянов

Рассмотрены оптические методы неразрушающего контроля – метод лазерной подсветки и системы с усилителем яркости, основанные на использовании лазеров на парах бромида меди. Данные методы позволяют визуализировать процессы и объекты, экранированные от наблюдателя мощной фоновой засветкой. Представлены результаты визуализации процесса горения порошковых систем, с температурой горения от 1500 до 2000 К с высоким временным разрешением

**Ключевые слова:** лазерный монитор, усилитель яркости, самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), динамика горения, лазер на парах меди

### Введение

Один из способов получения широкого спектра различных неорганических соединений и сплавов непосредственно связан с использованием энергосберегающего процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [1]. Суть его заключается в том, что экзотермическая реакция протекает в самоподдерживающемся режиме в виде тепловой волны в достаточно узкой зоне (от десятков микрон до нескольких миллиметров), отделяющей исходную смесь от конечных продуктов реакции.

Для получения материалов методом СВС необходимо располагать комплексом сведений о механизме процесса, о связи параметров химического взаимодействия с закономерностями формирования структуры и состава продуктов реакции. При выяснении механизма реагирования и образования структуры в волнах СВС принципиальное значение имеют методы, позволяющие наблюдать и регистрировать процесс горения в реальном времени, что является весьма сложной задачей, в силу больших скоростей движения волны СВС (десятки миллиметров в секунду) и высокой температуры взаимодействия компонентов (до 3000 К) в реакционной зоне.

В настоящее время для изучения динамики горения успешно применяются цифровые высокоскоростные видеокамеры. Компьютерная обработка микровидеосъемки методами яркостной и цветовой пирометрии позволяет изучать тепловую микроструктуру самого фронта горения, а также получать локальное распределение температуры в поле видео кадра [2,3]. К недостаткам данных методик можно отнести следующие: 1 – ограничение температурного диапазона изучаемых

объектов в интервале 500÷600°С, 2 – невозможность различать объекты, находящиеся в различных структурных состояниях, но имеющих одинаковую температуру.

### Результаты экспериментов и их обсуждение

В целом, процессы, протекающие в условиях фоновой засветки, возможно визуализировать с использованием лазерных методов и средств неразрушающего контроля. К ним относится метод лазерной подсветки, а так же системы с усилителями яркости – лазерный монитор, лазерный проекционный микроскоп [4].

Метод лазерной подсветки (рисунок 1 а) заключается в следующем: объект наблюдения подсвечивается внешним источником излучения (лазером), отраженный сигнал пропускают через полосовой фильтр и затем фиксируют с помощью регистрирующей аппаратуры. Таким образом, регистрируется объект целиком, либо его значительная часть. Достоинством предлагаемого метода является его простота и возможность «компактной» реализации за счет применения лазеров, обладающих малыми массогабаритными параметрами (например, полупроводниковых). Однако схема имеет и ряд недостатков. Во-первых, объект необходимо освещать достаточно мощным излучением, чтобы уровень сигнала на входе регистратора был выше порога чувствительности. Это может приводить к деструктивному воздействию на объект и исказить реальную картину процесса. Во-вторых, чем выше уровень фоновой засветки, тем более узкой должны быть и линия излучения лазера, и полоса пропускания фильтра. В противном случае, изображение будет экранировано от наблюдателя. Это значительно увеличивает стоимость метода.

## РАЗДЕЛ V. ИЗМЕРЕНИЕ, КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

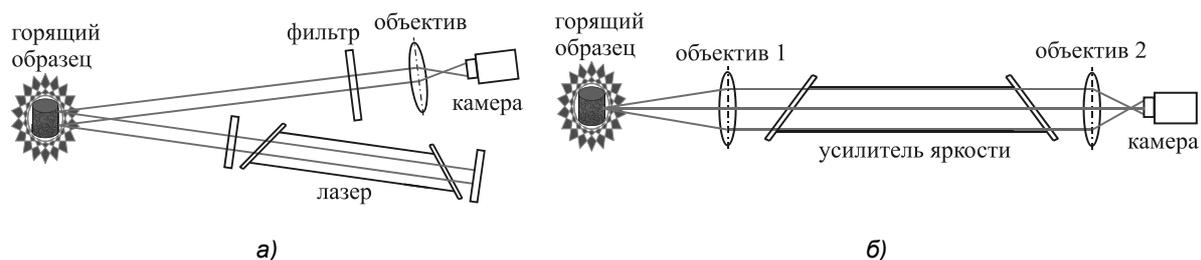


Рисунок 1 - Наблюдение объектов, экранированных засветкой: а – метод лазерной подсветки, б - лазерный монитор

Таким образом, метод лазерной подсветки применим для наблюдения процессов, протекающих в условиях, когда энергия широкополосной экранирующей засветки, приходящаяся на спектр генерации используемого лазера, значительно меньше энергии генерации лазера. В этом случае влияние засветки будет минимальным. То есть необходимо использовать более мощный лазер с высокой спектральной яркостью.

Второй метод – использование систем с усилителями яркости изображения [5]. На рисунке 1 б представлена схема лазерного проекционного микроскопа (монитора) [6,7] на основе лазера на парах бромида меди. Принцип действия заключается в следующем: излучение сверхсветимости лазерного усилителя фокусируется на объекте с помощью объектива, отраженный сигнал, пройдя через объектив, попадает в активную среду в момент времени, когда еще имеется инверсная населенность. Кроме того, в усилитель попадает и сигнал от широкополосной засветки. Однако усиливается только сигнал с длиной волны из спектра генерации используемого лазера. Поэтому на выходе усилителя яркости будет усиленное по яркости изображение объекта, причем цвет изображения соответствует длине волны усилителя яркости. В этом случае, как и в обычном микроскопе, наблюдается лишь малая часть объекта, с пространственным разрешением порядка 1 мкм. Понятие лазерный монитор было введено Климовским И.И. [7] и означает, что наблюдается быстропротекающий процесс, экранированный от наблюдателя фоновой засветкой, в режиме реального времени.

При визуализации процессов СВС использовался  $\text{CuVg}$ -лазер длиной активной зоны 90см, диаметр 5см. В режиме генератора с плоскопараллельным резонатором мощность генерации составляла 4Вт, в режиме сверхсветимости 500мВт. Частота следования импульсов генерации составляла 24кГц.

Процесс СВС изучался на примере систем  $\text{Ti-B-Cu}$ ,  $\text{Ni-Al-CaCO}_3$ . Горение смесей инициировалось с помощью вольфрамовой спирали, нагретой электрическим током. Изменения топологии реакционных систем в ходе реакции визуализировалось с помощью метода лазерной подсветки (рисунок 2).

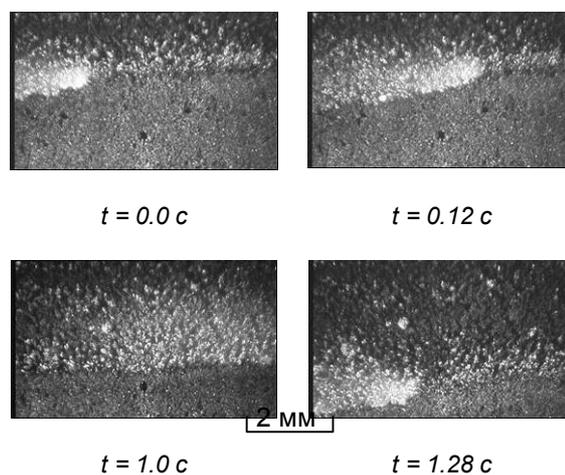


Рисунок 2 – Процесс горения системы  $\text{Ti-B-Cu}$ , визуализированный с помощью лазерной подсветки.

Данный метод позволяет получать четкое видеоизображение топологии системы в течение всех циклов превращений за счет высокой яркости светового потока, отраженного от поверхности образца, который в выделенном интервале длин волн превосходит интенсивность теплового излучения реакционной волны. Область зрения составляет 5х4мм. Скорость нагрева подсвеченной лазером поверхности образца не превышала 1.5К/с, что исключало тепловое воздействие излучения на протекание реакции. Структурное состояние системы идентифицировались по различию отражательной способности поверхности образца до и после прохождения фронта горения.

Например, расплавленные металлические капли имеют характерный блеск в отра-

женных лучах, а формирование пор приводит к уменьшению степени отражения лазерного излучения. Процесс плавления сопровождается переходом частиц в сферическую форму с повышенной отражающей способностью поверхности. В результате применения этой методики установлено, что в процессе спинового горения системы Ti-B-Si вдоль траектории движения локального спинового очага формируются чередующиеся слои с различной пористостью. Последнее обусловлено эффектом термокапиллярного перераспределения меди в направлении распространения горения.

Следующим этапом стало применение высокоскоростных лазерных мониторов для исследования процессов СВС. Усилитель яркости выполнен на основе лазера, описанного выше. Скорость съемки 1400 кадров/сек., область зрения составляла 1.5x1.5мм. Результаты визуализации процесса горения представлены на рисунке 3. В качестве скоростного регистратора использовали скоростную CCD-камеру Fastec HiSpec 1 [8].

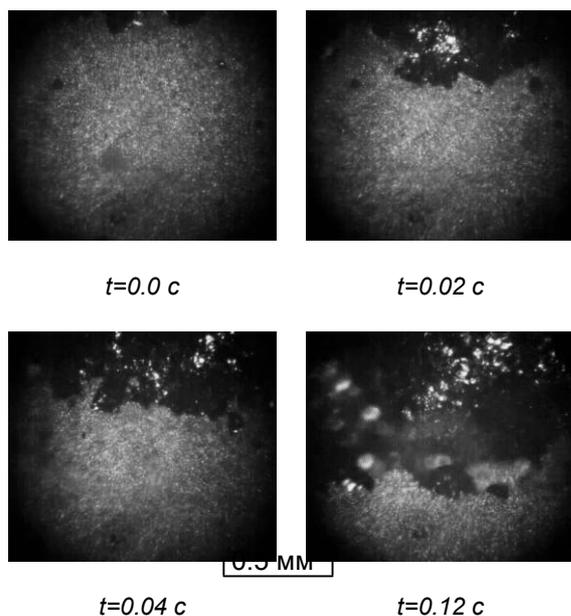


Рисунок 3 – Процесс горения системы Ni-Al-CaCO<sub>3</sub>, визуализированный с помощью лазерного монитора.

В данном случае полностью исключается влияние теплового излучения на формирование видео изображения. Использование метода лазерного монитора позволило наблюдать изменения морфологии поверхности частиц непосредственно в ходе быстропротекающих реакционных превращений системы. По полученным данным определен интервал характерного времени ( $10^{-3} \div 10^{-2}$ с) процесса

М.В. ТРИГУБ, Г.С. ЕВТУШЕНКО, А.И. КИРДЯШКИН, В.Д. КИТЛЕР, Р.А. ЮСУПОВ, Ф.А. ГУБАРЕВ, С.Н. ТОРГАЕВ, Д.В. ШИЯНОВ

реакционной коалесценции плавящихся компонентов в волне горения, соответствующий измерениям в ранних работах. Кроме того, лазерный монитор позволяет полностью избавиться от фоновой засветки, и, соответственно, наблюдать процессы с более высокими температурами, которые наблюдать с помощью лазерной подсветки уже невозможно.

### Заключение

Для визуализации процессов СВС возможно применение обоих, рассмотренных в работе лазерных методов. Причем предлагается использовать именно лазер на парах бромида меди, благодаря ряду особенностей. Во-первых, высокая частота следования импульсов (до 400кГц с активными добавками), позволяет визуализировать быстропротекающие процессы с высоким временным разрешением, как в первом, так и во втором случае. Во-вторых, узкая линия генерации и усиления, соответственно, высокая спектральная яркость зондирующего излучения и наличие «виртуального» узкополосного фильтра (случай лазерного монитора), позволяют наблюдать объекты и изучать процессы, экранированные от наблюдателя мощной собственной (либо внешней) засветкой.

Область применения каждого из представленных методов различна. Метод лазерной подсветки позволяет получать изображения высокого качества (разрешения), однако, уже при температуре в 1000К наблюдается влияние паразитной фоновой засветки, что не позволяет наблюдать процессы с более высокими температурами. Лазерный монитор позволяет избавиться от паразитного влияния фоновой засветки даже при температурах горения 3000К (максимальная температура исследованных смесей), однако, качество получаемого изображения уступает первому методу. Совместное использование обоих методов позволит получить более полные сведения о структурных изменениях, происходящих непосредственно во время горения.

Работа выполнена совместно в ТПУ, г. Томск, ИОА СО РАН, г. Томск и ОСМ ТНЦ СО РАН, г. Томск, при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Госзадание №7.586.2011.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мержанов, А. Твердопламенное горение / А.Г.Мержанов, А.С.Мукасян. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2007 – 336 с.
2. Гарколь, Д. Новая методика высокоскоростной яркостной пирометрии для исследования про-

## РАЗДЕЛ V. ИЗМЕРЕНИЕ, КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

- цессов СВС. / Д. А. Гарколь, П. Ю. Гуляев, В. В. Евстигнеев, А. Б. Мухачев // ФГВ. – 1994 – № 1(30). – С. 72-77.
3. Саламатов, В. Телевизионная система определения динамических температурных полей в процессах СВС. / В.Г. Саламатов, Г.А. Цыба, А.И. Кирдяшкин, Ю.М. Максимов // Измерительная техника. – 2002 – № 9. – С. 41-45.
  4. Тригуб, М. Лазерный монитор с возможностью покадровой регистрации изображений. / М.В. Тригуб, Г.С. Евтушенко, Ф.А. Губарев, С.Н. Торгаев // Контроль. Диагностика. – 2011. – Спец.Выпуск. – С. 140-143.
  5. Пасманик, Г. Оптические системы с усилителями яркости / Г.А. Пасманик, К.И. Земсков, М.А. Казарян / – Горький: ИПН АФ СССР, 1988 – 173 с.
  6. Земсков, К. Лазерный проекционный микроскоп. / К.И. Земсков, А.А. Исаев, М.А. Казарян, Г.Г. Петраш // Квантовая электроника. - 1974. - № 1(1). - С. 14 – 15.
  7. Абрамов, Д. Визуализация с помощью лазерного монитора взаимодействия лазерного излучения с поверхностью стекло- и пироуглерода / Д.В. Абрамов, А.Ф. Галкин, С.В. Жаренова, И.И. Климовский, В.Г. Прокошев, Е.Л. Шаманская // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – №2(312). – С. 97 – 101.
  8. Евтушенко, Г. Скоростная визуализация микрообъектов посредством активных сред лазеров на парах металлов в условиях мощной засветки. / Г.С. Евтушенко, Ф.А. Губарев, В.Б. Суханов, Д.В. Шиянов, С.Н. Торгаев, М.В. Тригуб //Известия Томского политехнического университета. – 2009. – т. – №4(315) – С. 141-146
- Аспирант М.В. Тригуб*<sup>1,2</sup> – [trigub@tpu.ru](mailto:trigub@tpu.ru); *д.т.н., проф. Г.С. Евтушенко*<sup>1</sup> – [ime@tpu.ru](mailto:ime@tpu.ru); *к.ф.-м.н. А.И. Кирдяшкин*<sup>3</sup> – [maks@fisman.tomsk.ru](mailto:maks@fisman.tomsk.ru); *к.ф.-м.н. В.Д. Китлер*<sup>3</sup> – [kitler\\_1@mail.ru](mailto:kitler_1@mail.ru); *к.т.н. Р.А.Юсупов*<sup>1,2,3</sup> – [rash1956@yandex.ru](mailto:rash1956@yandex.ru); *к.ф.-м.н. Ф.А. Губарев*<sup>1,2</sup> – [gfaqddtpu@tpu.ru](mailto:gfaqddtpu@tpu.ru); *аспирант С.Н. Торгаев*<sup>1,2</sup> – [torgaev@tpu.ru](mailto:torgaev@tpu.ru); *к.ф.-м.н. Д.В. Шиянов*<sup>2</sup> – [qel@asd.iao.ru](mailto:qel@asd.iao.ru)

<sup>1</sup>Томский политехнический университет, Институт неразрушающего контроля, каф. ПМЭ, (3822)419-605

<sup>2</sup>ИОА ТНЦ СО РАН, г. Томск, Лаборатория квантовой электроники, (3822) 492-989

<sup>3</sup>Отдел структурной макрокинетики ТНЦ СО РАН, г. Томск, (3822) 492-497

УДК 621.7.08

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «РАБОЧЕЕ КОЛЕСО» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ

Д.А. Осипович

Рассмотрена проблема изготовления и контроля деталей турбин, имеющих геометрические элементы сложной формы. Предложен способ сокращения брака на производстве типовых деталей путем выполнения промежуточного контроля сложнопрофильной геометрии. Разработан алгоритм выполнения контрольных операций для типовых деталей с использованием оптической системы измерения и «оцифровки».

**Ключевые слова:** оптические измерения, трехмерное сканирование, промежуточный контроль, турбиностроение

### Введение

Современное производственное предприятие работает в условиях жесткой конкуренции как в рамках отрасли одной страны, так и в мировом масштабе. Решение задачи выживаемости и прибыльности в таких условиях определяется одновременными процессами повышения качества и эксплуатационных характеристик продукции и сокращения ресурсоемкости ее производства. Эта проблема особенно характерна для такой передовой, активно развивающейся отрасли промышленности как турбиностроение. Для разработки конструкции современной турбины и ее важнейшего элемента – лопатки привле-

каются значительные научные и инженерные интеллектуальные ресурсы. Результат их проектирования представляет собой геометрические поверхности крайне сложной формы, описываемые разнообразными математическими закономерностями, требующими исполнения высочайшей точности (рисунок 1).

Именно это исполнение представляет собой одну из самых сложных технологических задач. Для ее разрешения принято использовать наиболее передовые технологические инструменты: пятиосевую фрезерную и электроэрозионную обработку, высокоточное литье по выплавляемым и выжигаемым

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2/1, 2012