

УДК 004.932, 004.415.2, 621.383.8

## КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СВ-СИНТЕЗА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЕГО ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

**В.В. Белозерских<sup>1</sup>, П.Ю. Гуляев<sup>2</sup>, В.И. Иордан<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Алтайский государственный университет, г. Барнаул

<sup>2</sup>Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

Статья посвящена обоснованию концептуального подхода к разработке интеллектуальной системы управления процессом СВ-синтеза на новом технологическом уровне – программно управляемом синтезе материалов. Такой подход использует результаты анализа тепловизионных изображений и предсказательного моделирования СВ-синтеза в процессе распространения фронта волны горения и исключает непосредственное участие человека-оператора.

**Ключевые слова:** интеллектуальная система управления, процесс СВ-синтеза, анализ тепловизионных изображений, предсказательное моделирование.

Одним из эффективных способов получения и обработки порошковых материалов с необходимыми функциональными характеристиками является «самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС)» в многокомпонентных (гетерогенных) экзотермически реагирующих порошковых смесях, для которого традиционно рассматриваются 4 области (зона предварительного прогрева, предвоспламенительная зона, высокотемпературная зона экзотермической реакции и зона догорания). В последней зоне в большей степени происходят диффузионные процессы, сопровождающиеся процессами фазовых и структурных превращений наряду с закалкой.

Новейшими методами высокоскоростной микропирометрии [1] достаточно эффективно исследуются теплофизические свойства материалов в экстремальных температурных условиях [2, 3], механизмы структурообразования пористых СВС-материалов [4, 5] и эффекты неустойчивых режимов горения [6]. Традиционное применение термодатчиков, размещенных в объеме пористой реагирующей смеси, вносит существенные искажения в механизм теплообмена, и, тем самым, не позволяет достоверно исследовать тепломассоперенос и пространственную структуру тепловых полей на двух начальных низкотемпературных стадиях развития волны СВ-синтеза. Применение неохлаждаемых кремниевых фотоприемников также малоэффективно, так как ИК-излучение таких низкотемпературных зон ре-

акции лежит за пределами их спектрального диапазона чувствительности.

Изучение низкотемпературных стадий процесса СВ-синтеза оказывается актуальным не только по причине того, что эти стадии в качестве начальных «стартовых» условий определяют химическую кинетику и теплообмен в ходе развития реакции, но и в качестве стадий, предопределяющих возникновение многих специфических явлений (например, «сверхадиабатического» эффекта Алдушина-Сеплярского при фильтрационном горении, формирование и равновесный распад критических зародышей новой фазы виртуальных интерметаллидов в режиме теплового взрыва и т.д.). Разработка средств регистрации и контроля таких явлений важна для развития СВС-технологии на новом технологическом уровне – программно управляемом синтезе материалов, исключая непосредственное участие человека-оператора и использующем в процессе распространения фронта волны горения результаты анализа тепловизионных изображений и предсказательного моделирования СВ-синтеза.

Излагаемый здесь концептуальный подход преследует цель, заключающейся в разработке и создании такой системы управления процессом СВ-синтеза, которая с помощью тепловизионной системы регистрации в комбинации с регистратором в оптическом диапазоне производила бы по изображениям в текущий момент времени интеллектуальный анализ тепломассопереноса и пространственной структуры теплового поля волны горения, используя из своей «базы знаний»

типовые изображения, с последующей выработкой управляющих воздействий в локальных зонах СВ-синтеза с целью получения конечных СВС-продуктов с заданными свойствами. Т.о., проектируемая интеллектуальная система управления процессом СВ-синтеза должна функционировать в «активном» целенаправленном режиме, а не в «пассивном», предопределенном исходными параметрами реагентов и режимом протекания СВС-процесса. На основе оперативного тепловизионного анализа и контроля такими управляющими воздействиями, которые изменяли бы «самораспространяющийся» характер высокотемпературного синтеза в нужном исследователю направлении, могут выступать способы электростимуляции, управляемые воздействия плазменной струей и лазерным излучением и др.

Таким образом, можно обозначить задачи тепловизионного контроля и изучения особенностей процессов обработки порошков на низкотемпературных стадиях СВС:

1. Визуализация в зоне 1 предварительного прогрева тепловых потоков фильтрующихся горячих газов из высокотемпературных зон и расчет изменения начальных условий зажигания (времени химической индукции) реакции технологического горения (постоянной времени зажигания);

2. Визуализация в зоне 2 фильтрующегося под напорным давлением газа потока расплава легкоплавкого компонента (капиллярно смачивающего) для выявления механизма формирования проницаемой пористости и расчета локальной нестехиометрии (анализ возникновения виртуальных интерметаллидов и их дальнейшей эволюции на высокотемпературной стадии догорания)

3. Визуализация движения тепловой волны предварительного прогрева на границах свариваемых материалов, уплотнениях и других неоднородностях дисперсной среды, приводящей к появлению эффектов структурного распада зоны СВ-синтеза (инверсии, коалесценции, «блинчиков» и дроби)

4. Визуализация пространственной и временной динамики зарождения и распада критических зародышей новой фазы, либо виртуальных интерметаллидов на начальной стадии СВС в режиме теплового взрыва (высокотемпературного прогрева), проводимая для выяснения закономерностей устойчивости траектории реакции в температурных или молярных координатах при выявленном разбросе начальных теплофизических параметров реакции (аналог химического критерия

Юм-Розари о 15% нестехиометрии начального состава смеси).

В сочетании с высокотемпературной диагностикой методы тепловизионного контроля СВ-синтеза позволяют надеяться на исследование таких фундаментальных основ материаловедения, как уточнение фазовых диаграмм бинарных смесей в области изомерных твердых растворов и низкотемпературных эвтектик.

Для решения сформулированных задач предлагается использование устройства на основе болометрической ИК-матрицы. Использование ИК-матрицы позволит определить количество неразвившихся центров горения (с температурой, не достигшей критической) и увидеть формирование фронта горения. Это особенно актуально при исследовании процессов СВ-синтеза в низкоэкзотермических смесях (плохо горящих, трудно синтезируемых), требующих для поддержания стабильности режима горения определенной стимуляции (энергоактивации), например, электрическим током или плазменной струей. Контроль и управление такими процессами возможен как в режиме формирования соотношения компонентов для СВ-синтеза, так и в процессе синтеза, путем стимуляции процесса на основе результатов компьютерной обработки получаемых в реальном времени ИК-изображений. Для «высокоэкзотермических» смесей возможно определение температурного распределения во фронте и сразу за фронтом горения, что может говорить о качественных показателях процесса и особенно актуально для производственного контроля непосредственно в локальной зоне синтеза.

Принятие решения о введении в действие конкретного активатора планируется осуществлять в режиме реального времени на основе программно-аппаратной обработки изображений как в ИК-диапазоне (с помощью микроболометрической ИК-матрицы), так и в видимой области спектра (с помощью ПЗС-матрицы). Такой комплексный подход (рис. 1) позволит отслеживать как медленные низкотемпературные эффекты, так и высокоскоростное нарастание температуры в зоне очага теплового взрыва.

Совместное использование в качестве приемников изображения различных как по принципу работы, так и по быстродействию и чувствительности, требует применения специализированных схем сопряжения, имеющих различный интерфейс в сторону приемника изображения и согласованный общий интерфейс в сторону вычислителя (процес-

## КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СВ-СИНТЕЗА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЕГО ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

сора). Первичную обработку изображения от приемных ИК- и ПЗС-матриц и задачу сопряжения интерфейсов (с точки зрения эффективности предпочтительно) необходимо возложить на современные программируемые логические схемы (ПЛИС). Математическую обработку и формирование управляющих воздействий на процесс СВС, адекватнее всего, возложить на современные микроконтроллеры, имеющие в составе своей архитектуры сопроцессорные модули цифровой обработки сигналов, например ARM-процессоры с ядром Cortex-M4.



Рисунок 1 – Структурная схема интеллектуальной системы управления процессом СВС

Микроконтроллер получает первично обработанные «изображения» с ИК-матрицы и ПЗС-матрицы. Первичную обработку (накопление, фильтрацию) для каждого приемника изображения производит ПЛИС схемы сопряжения. Выполнение первичной обработки внешними по отношению к микроконтроллеру устройствами снижает требование к пропускной способности каналов обмена между ПЛИС и микроконтроллером.

Режимы работы оперативно задаются посредством ввода с клавиатуры и отображаются на дисплее. На дисплее также отображаются характеристики текущего процес-

са синтеза или характеристики процессов, хранимых в памяти. На основе хранимых в памяти «изображений» процессов синтеза и/или анализа получаемых «изображений» формируются стимулирующие воздействия на процесс СВС и производится контроль за протеканием реакции. При выходе реакции за установленные критерии производится оповещение оператора и коррекция стимулирующих воздействий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Garkol D.A., Gulyayev P.Yu., Evstigneyev V.V., Mukhachev A.B. A new procedure of high-rate brightness pyrometry for studying the SHS processes // *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1994, Volume.30, № 1, P. 72-78.
2. Gulyayev P.Yu., Evstigneyev V.V., Philimonov V. Yu. The Temperature Conductivity of the Reacting Mediums // *Advances In Condensed Matter & Materials Research*, 2002, Volume 2, P. 235-241.
3. Гуляев П.Ю., Калачев А.В. Определение теплофизических параметров пористых СВС материалов // *Ползуновский вестник*. – 2004. – №1. – С. 69-73.
4. Гуляев П.Ю., Иордан В.И., Калачев А.В. Исследование тепловой структуры волны горения самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // *Известия АлтГУ. Физика*. – 2005. – № 1(45). – С. 104-109.
5. Евстигнеев В.В., Гуляев П.Ю., Иордан В.И., Калачев А.В. Теоретические модели и экспериментальные методы исследования механизма формирования тепловой структуры в волне горения самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // *Ползуновский вестник*. – 2005. – № 1. – С. 314-321.
6. Иордан В.И., Гуляев П.Ю., Евстигнеев В.В. Комплекс методов цифровой обработки изображений для исследования эффектов локальной неустойчивости и нестационарности волны горения процесса СВС // *Ползуновский вестник*. – 2005. – №4, ч.1. – С. 152-170.

**Белозерских Василий Вениаминович** – ст. преподаватель каф. вычислительной техники и электроники, тел.: (3852) 380-751, e-mail: [bww@phys.asu.ru](mailto:bww@phys.asu.ru); **Гуляев Павел Юрьевич** – д.т.н., профессор, зав. каф. физико-химии процессов и материалов, тел. (3467) 357-797, e-mail: [P\\_Gulyaev@ugrasu.ru](mailto:P_Gulyaev@ugrasu.ru); **Иордан Владимир Иванович** – к.ф.-м.н., доцент каф. вычислительной техники и электроники, тел. (3852) 380-751, e-mail: [jordan@phys.asu.ru](mailto:jordan@phys.asu.ru)