СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рахштадт А.Г. Пружинные стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1971. – 496 с.
2. Солонин М.И., Кондратьев В.П., Вотинов С.Н. Сплав ХНМ-1 как перспективный материал для элементов конструкции ядерных и термоядерных реакторов с водным теплоносителем // ВАНТ. Сер. Материаловедение и новые материалы. – 1995. – Вып. 1(52). – С. 13–20.
3. Скаков М.К., Мукажанов Е.Б., Ахметжанов Б.К. Фазово-структурные изменения в дисперсионно-твердеющем сплаве 47ХНМ после закалки // Известия Национальной Академии наук РК. Серия химическая. Алматы. – 2006. – № 2(356). – С. 75–78.

Поступила 14.11.2006 г.

УДК 536.46

АЛТАЙСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР «ТЕРМОСИНТЕЗ» ПО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ СИНТЕЗУ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В.В. Евстигнеев

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Изложены достижения проблемной научно-исследовательской лаборатории СВС-материаловедения, созданной в 1992 г. на базе Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Открытие в 1967 г. А.Г. Мержановым самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) дало новый импульс к поиску и пониманию физико-химических механизмов горения в различных агрегатных состояниях вещества: в первую очередь – горения в твердой фазе. Метод СВС обеспечил возможность получения материалов с необычными свойствами из-за специфических условий синтеза: существенной термодинамической неравновесности и высоких температурных градиентов. Алтайский государственный технический университет является одним из пяти научных центров Российской Федерации, занимающихся исследованием процессов СВС. В 1992 г. по нашей инициативе и заданию Министерства образования была создана проблемная научно-исследовательская лаборатория СВС-материаловедения [1–6].

Определены направления исследований: получение новых материалов методом СВС и напыление защитных покрытий. Таким образом было положено начало проведения научных исследований. В 2003 г. образовано 5-е региональное Алтайское отделение Научного Совета по горению и взрыву РАН в области исследований процессов СВС «ТЕРМОСИНТЕЗ» нетрадиционной порошковой металлургии, разработки новейших технологий получения композиционных материалов, суперсплавов и изделий на их основе, детонационного нанесения покрытий, а также разработки измерительных систем и диагностической аппаратуры на основе интегральных фотодиодных структур и микропроцессорных контроллеров.

В состав научного коллектива, насчитывающего около 30 сотрудников, входят 3 доктора и 12 кандидатов наук, научные сотрудники, инженеры, аспиранты и студенты. За время существования лаборатории подготовлено и защищено 5 докторских и 17 кандидатских диссертаций. Проводятся работы по основным разделам:

- теоретические исследования процессов твердофазного горения с целью создания принципов управляемого режима синтеза, исследование динамики развития очагов горения в процессе СВС, оценки параметров энергии активации, теплопроводности, исследование формирования пористой структуры в реакционной порошковой системе с добавками инертного материала, исследование неустойчивости волны горения, определение влияния плазмы на СВС-процессы, твердофазные превращения в тонких пленках, высокоэнергетические воздействия концентрированными потоками энергии на реакционную среду и т. п.;
- разработка и адаптация новых технологий СВС, промышленное освоение и внедрение технологий, например, в производстве фильтрующих элементов и защитных покрытий. Коллективом ученых выдвинута и развивается концепция интегральных СВС-технологий. Суть ее в том, что весь цикл разработки проводится применительно к общему прототипу (базовому образцу), а «специализация» материалов к конкретным условиям эксплуатации осуществляется на заключительном этапе путем модифицирования свойств. При необходимости расширения номенклатуры образцов или изменений требований к материалу вновь осуществляется лишь модификация базового образца. Существенное

развитие получили методы оптической микропирометрии дисперсных сред.

Разработан оригинальный экспериментальный комплекс для исследования тонкой тепловой структуры волны горения (рис. 1).

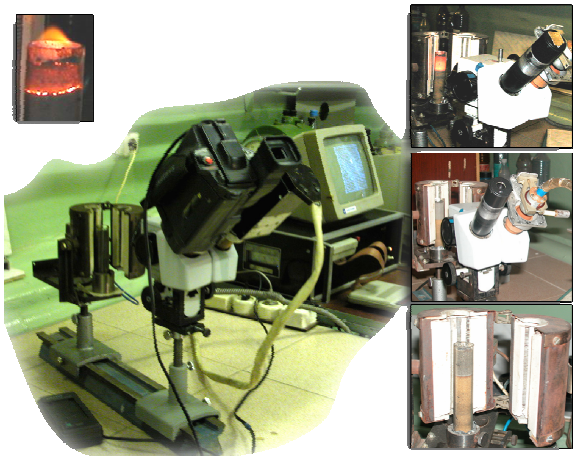

Рис. 1. *Экспериментальный комплекс микропирометрических и оптических приборов для исследований процессов формирования тепловых структур в волне СВС*

Создана комплексная методика для исследования физических процессов структурно-фазовых превращений в СВС-материалах. Суть ее в сопоставлении термограмм высокого временного и пространственного разрешения с диаграммами фазовых состояний, а также в определении характерных масштабов в тепловой структуре волны горения СВС (рис. 2).

Среди материалов, технологические основы синтеза которых наиболее разработаны, особое место занимают порошки тугоплавких интерметаллидных соединений. Известно, что интерметаллидные соединения характеризуются набором физико-химических свойств, к которым следует отнести высокую термостойкость, жаропрочность, стойкость к износу и коррозии при высоких температурах, стойкость к воздействию агрессивных сред и т. п. Нами проводился синтез в системах Ni-Al, Ti-Al, продуктом которого являются интерметаллиды различной стехиометрии и исследовано влияние состава шихты, дисперсности порошков, температуры подогрева на физико-химические свойства полученных материалов. Используя концепцию интегральных технологий, проведено легирование бинарных систем Ni-Al, Ti-Al, которые являются базовыми образцами, элементами IV подгруппы (Fe, Cr, Ti, Ni), а также неметаллами Si, B, C. Фактором, определяющим свойства, является существование высокотемпературных эвтектик одного из компонентов базовой системы с легирующим элементом. Разработаны семейства порошковых материалов интерметаллидного класса для напыления, обеспечивающих высокий уровень эксплуатационных характеристик покрытия. В развитие концепции интегральных технологий создана технология детонационно-газового напыления (ДГН) композиционных СВС-порошков, например, боридов титана и алюминидов титана. Технология ДГН, характеризующаяся высокой скоростью дисперсного потока (до 2000 м/с) и температурой (до 3000 К), позволяет обеспечить высокий уровень адгезии и получить почти компактный материал покрытия пористостью порядка 0,5...6 %.

Для изучения технологий напыления новых материалов в АлтГТУ создан экспериментальный стенд исследования импульсных газодисперсных

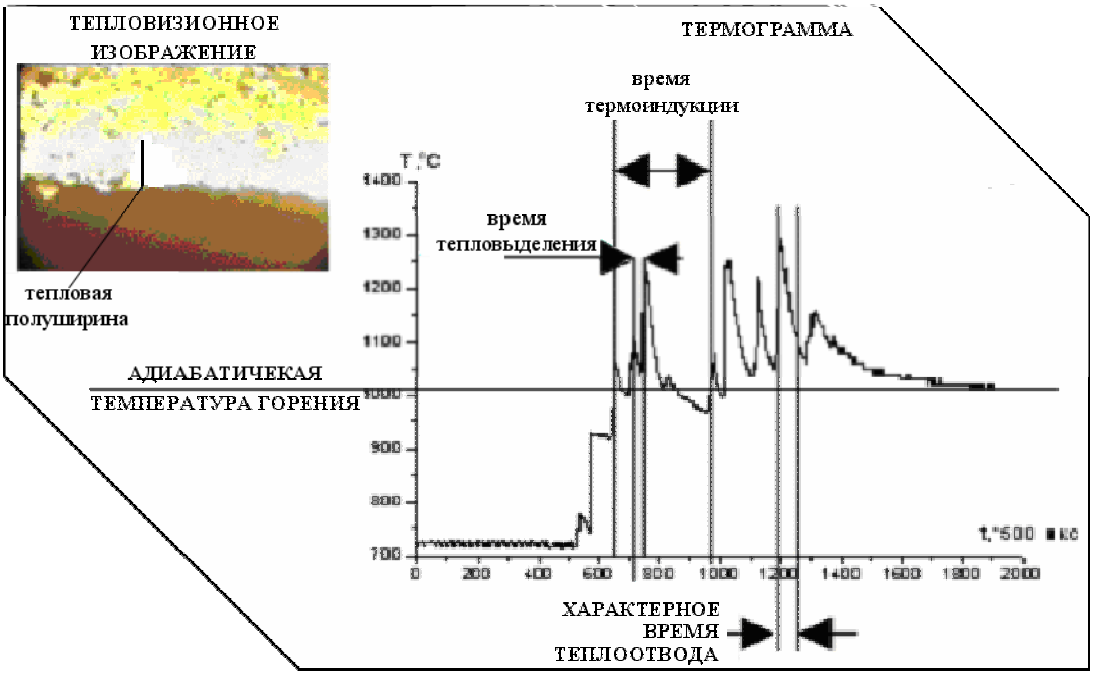

Рис. 2. *Тепловые структуры во фронте волны горения*

потоков на основе многоканального анализатора теплового спектра частиц конденсированной фазы и оптоэлектронного времяпролетного измерителя скорости дисперсного потока (рис. 3).

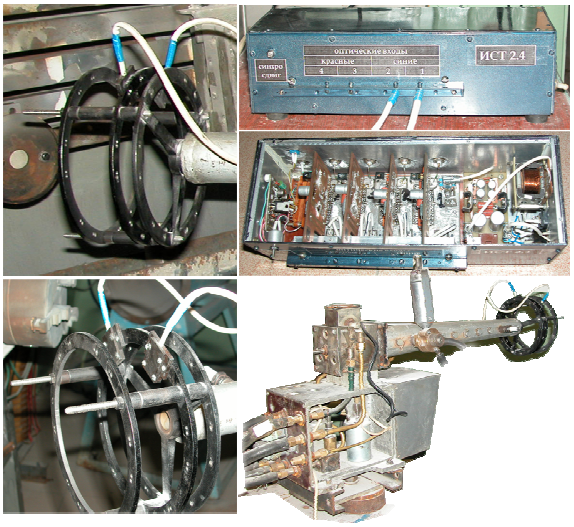

Рис. 3. *Экспериментальный стенд исследования импульсных газодисперсных потоков*

На поверхности основы при напылении происходят процессы, сопровождающиеся образованием новых фаз, причем в реакции принимают участие элементы связки. В результате экзотермических процессов происходит улучшение качества сцепления покрытия с основой. Таким образом, высокие температуры и давления, развиваемые в процессе ДГН, могут стимулировать процессы вторичного структурообразования, либо процессы образования новых фаз при напылении многокомпонентных систем. Индикация температуры дисперсной струи и поверхности основы дает возможность управления процессами структуро-фазообразования, значительно сократит энергозатраты и расход материалов на бессистемный поиск оптимальных режимов ДГН, открывает широкие возможности прогнозирования результатов процесса напыления, проводимых в тех или иных условиях. В процессе детонационно-газового напыления вопрос о динамике разогрева поверхности контакта основы с напыляемым слоем является весьма важным, поскольку температура контакта во многом определяет адгезионные свойства покрытия. В лаборатории СВС-материаловедения сконструирован специальный микротермопарный датчик, рис. 4, для контроля температуры поверхности с внешней стороны, температуры внутренней поверхности основы, и температуры газодисперсного потока.

Использование контактного микротермопарного датчика позволяет решить проблему диагностики дисперсного потока и контролировать температуру контакта слоя покрытия и основы, чего нельзя осуществить с использованием методов оптической пирометрии.

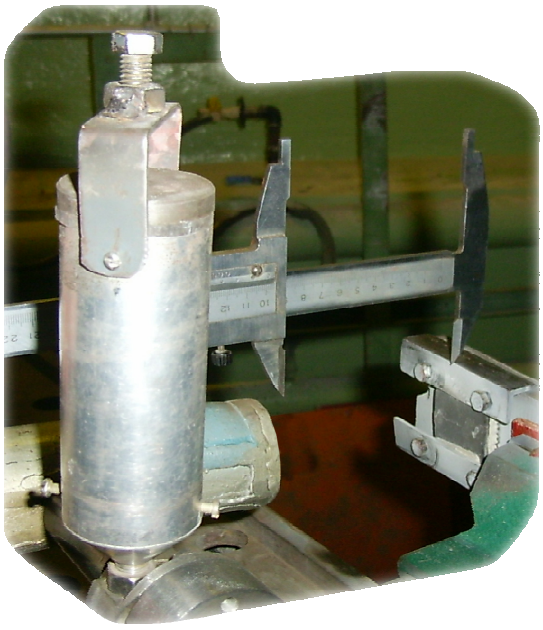

Рис. 4. *Датчик для контроля температуры поверхностей основы напыления и температуры потока*

В последнее время возрос интерес к методу электроискрового легирования применительно к упрочнению рабочих органов почвообрабатывающих машин. В настоящее время в качестве электродов используются сплавы ВК. Альтернативой им являются материалы на основе диборида титана, полученные методом СВС. Синтез проводился в смеси Ti+3B+Ni под давлением 10 МПа, инициирование проводили прямым пропусканием электрического тока. В результате обработки рабочей кромки лемеха почвообрабатывающих машин методом электроискрового легирования с применением полученного СВС-материала на основе TiB_2 получено покрытие с микротвердостью до 17 ГПа. Сплавы на основе алюминидов титана широко применяются в самолетостроении для производства газотурбинных двигателей и деталей из-за их малого удельного веса, высокой прочности к разрыву, давлению, действию агрессивных сред при высоких температурах. В АлтГТУ проводятся исследования фазообразования при синтезе алюминидов титана в режиме теплового взрыва, что имеет большое технологическое значение, т. к. дает возможность управления реакцией синтеза. Создан реактор для проведения СВС с тиристорным блоком управления нагрева и системой принудительного охлаждения шихты, а также установка температурной диагностики СВС в режиме теплового взрыва.

Для изучения динамики разогрева реагирующей смеси в режиме теплового взрыва сконструирован СВС-реактор, рис. 5.

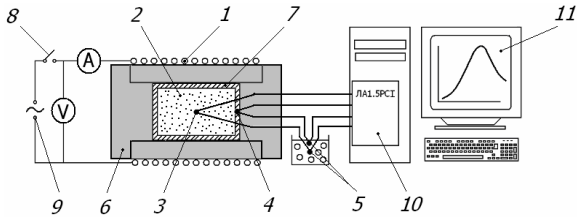

Рис. 5. *Блок-схема установки СВС в режиме теплового взрыва: 1) нагревательный элемент, 2) реагирующая смесь, 3) термопара для контроля динамики разогрева смеси, 4) термопара для контроля температуры стенки, 5) компенсирующие термопары, 6) стальной реактор, 7) теплоизоляционный асбестовый слой, 8) выключатель, 9) источник напряжения, 10) плата сбора и обработки данных ЛА 1.5 PCI, 11) монитор*

На протяжении последних десяти лет коллективом проводятся исследования пористых проницаемых материалов, полученных методом СВС. По результатам исследований освоено производство фильтров из алюминидов никеля для систем водоочистки энергетических установок, керамических фильтров на основе окислов алюминия и железа, используемых для очистки воздушно-газовых смесей, эмульсий и растворов. Послойный характер реакции СВС обуславливает направленный характер образования пористого каркаса получаемых материалов, что позволяет изготовить проницаемые материалы с малым гидравлическим сопротивлением при сохранении высоких фильтрующих свойств. Наличие «пристеночного эффекта» позволяет реализовать для СВС-фильтров режим поверхностной фильтрации и саморегенерации при очистке газопылевых сред с высокой степенью запыленности. Эффективность очистки эмульсии и воды – не менее 95 %, воздушно-газовых смесей и сажи – не менее 95...98 %. Коэффициент удержания соединений меди, хрома и никеля в гальванических и травильных растворах – не менее 95 %. Производительность фильтров варьируется в широких пределах от 1 до 1000 л/ч. Срок службы – не менее 1 года. Профилактика осуществляется простой промывкой водой или на ультразвуковой установке.

Одними из перспективных направлений в работе с пористыми проницаемыми материалами являются переработка отходов металлургического производства с восстановлением металлов из окислов с чистотой до 95 % и синтез низкоэкзотермических составов под воздействием электрического тока. Преимущества СВС перед традиционными металлургическими методами получения материалов проявляются тогда, когда процессы переноса избытка тепла в реакционной среде превышают масштабы диффузии. При этом проявляются наиболее интересные свойства материалов, т. к. из-за высоких градиентов концентрации и температуры создаются условия для возникновения нескольких фаз на границе исходных материалов.

Говоря об уникальном наборе физико-химических свойств материалов, полученных методом СВС, следует сказать и об уникальной технологической воспроизводимости и стабильности этих свойств, которая является, по-видимому, следствием автотормозящего характера «явления волновой локализации твердофазных реакций». Т. е. при одинаковых исходных условиях реакция СВС должна сама автоматически выходить на один и тот же режим горения. Ожидается, что при совершенствовании СВС будут достигнуты масштабы гетерогенности не только микро- и мезоструктур, но и наноуровня, когда рост удельной поверхности раздела фаз приведет к появлению новых возможностей и свойств. Такие свойства материалов могут обеспечить на уровне наноструктур, например, эффекты высокотемпературной сверхпроводимости или «структурной» памяти.

В целом для проведения индустриализации СВС необходима государственная программа поддержки развития этого направления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yevstigneev V.V., Volpe B.M., Milyukova I.V., Saigutin G.V. Integral technologies of self-spread high-temperature synthesis. – M.: Vysshaya shkola. 1996. – 274 p.
2. Evstigneyev V.V., Gulyayev P.Yu., Mukhachev A.B., Garkol D.A. A new procedure of high-rate brightness pyrometry for studying the SHS processes // Combustion, Explosion and Shock Waves. – 1994. – V. 30. – № 1. – P. 72–78.
3. Yevstigneev V.V., Volpe B.M., Milyukova I.V., Mukhachyov A.B., Garkol D.A. Two possible mechanisms of product formation in SHS-systems with intermetallides on the phase diagrams // The Int. Journal of SHS. – 1994. – № 2. – P. 123–130.
4. Self-spread high temperature synthesis. Materials and technologies. The collection of scientific papers edited by V.V.Yevstigneev. – Novosibirsk: Nauka, 2001. – 264 p.
5. Evstigneyev V.V., Gulyayev P.Yu., Philimonov V.Yu. The temperature conductivity of the reacting mediums // Advances in Condensed Matter & Materials Research. – 2002. – V. 2. – P. 235–241.
6. Evstigneev V.V., Filimonov V.Yu., Krasnoshekov S.V. Determination of the structure of the kinetic function in self-heating of the Ti-Al binary powder mixture with equiatomic composition // Journal of Advanced Materials. – 2003. – V. 10(1). – P. 94–99.

Поступила 14.11.2006 г.