

Э С С Е

д.х.н., профессор И.П. Боровинская
*Лаборатория СВС
ИСМАН*

(по материалам статьи А.Г.Мержанова «Счастливая судьба научного открытия», Ежегодник ИПХФ РАН, том IV, 2007 г. и доклада на конференции Мировой Академии Керамики (WAC) при вручении международного приза «Керамика – 2008», в соавторстве с И.П. Боровинской)

*«Создание СВС и теории этого синтеза
является выдающимся достижением
русской науки».*

Энциклопедия Википедия

В 70-х годах прошлого века в Отделении Института химической физики Академии наук СССР, возглавляемом тогда лауреатом Нобелевской премии академиком Н.Н. Семеновым при проведении фундаментальных исследований процессов горения порохов и взрывчатых веществ было сделано открытие, получившее название «Явление волновой локализации автотормозящихся твердофазных реакций» (твердое пламя), которое, казалось бы, никакого отношения не имело к практическим делам и не могло быть использовано в повседневной жизни. Открытие сделал ученик Н.Н. Семенова А.Г. Мержанов (сейчас академик РАН) со своими сотрудниками. Некоторое время это открытие «работало» на теорию горения, расширяя ассортимент систем, не изученных ранее, и принося многочисленные новые формы самого процесса твердофазного горения. Появился целый цикл теоретических и экспериментальных работ специалистов по горению, в том числе таких известных, как академик Я.Б. Зельдович, посвященных изучению и описанию механизма неизвестного ранее «спинового горения», послойного и автоколебательного горения, твердофазного и фильтрационного горения и других разновидностей этого процесса. В отличие от порохов и взрывчатых веществ исходными компонентами реакции горения в этом случае служили пары металл-неметалл (например, титан-бор, цирконий-углерод и др.), которые обладали большим запасом внутренней энергии и при взаимодействии выделяли большое количество тепла, нагревая реакционную массу до высоких температур ($1000 \geq 3000^{\circ}\text{C}$). Почти сразу исследователи процессов поняли, что в результате горения синтезируются очень важные в практическом отношении неорганические вещества: карбиды, бориды, нитриды, силициды, оксиды и др.

тугоплавкие соединения, составляющие основу широкого круга современных материалов, таких как твердые сплавы, высокотемпературная керамика, абразивные материалы, пигменты, твердые смазки и др. При этом оказалось, что близкий по своим характеристикам к экстремальным процесс горения (высокие температуры, «секундные и минутные» скорости образования веществ), не только на несколько порядков ускоряет и упрощает синтез соединений, но и вносит свои коррективы в структуру и свойства образующихся веществ. Так синтез нитридов при горении металлов и неметаллов в азоте высокого давления (до 1000 атм.) приводит к образованию спеченных материалов с каркасными структурами, обладающих высокой коррозионной стойкостью к расплавам металлов, шлаков значительно превышающей стойкость аналогичных материалов, полученных традиционными методами спекания. Горение сложных систем металлов с неметаллами и тугоплавкими соединениями позволило синтезировать в одну стадию компактные многокомпонентные композиционные материалы, в том числе т.н. «дисперсноупрочненные», обладающие высокой механической прочностью в широком диапазоне температур. Были получены керамические материалы на основе силанов, работающие в агрессивной атмосфере при температурах выше 2000°C и композиты на основе нитрида бора, стойкие в агрессивной среде до 3500°C. Также на основе нитрида бора удалось «сконструировать» в процессе горения многокомпонентную керамику, которая при одинаковом составе, но разной микроструктуре обладает совершенно различными электрофизическими свойствами: диэлектрик-электропроводник. Порошки карбида титана, полученные при температуре горения около 3000°C, обладая практически монокристалльной структурой нашли применение в абразивной промышленности, заменив дорогие алмазные, токсичные «пасты Гойя» и др. абразивы. Примеров использования СВС-продуктов уже в первые годы изучения возможностей технологического горения можно привести очень много.

Полученные в короткий срок результаты привели к созданию нескольких вариантов принципиально новых высокопроизводительных, энергосберегающих технологий, которые получили название «самораспространяющийся высокотемпературный синтез» (СВС). Большое значение для становления и широкого развития новых технологий в СССР имела активная правительственная поддержка, в результате которой был создан Межотраслевой научно-технический комплекс «Термосинтез», включивший многие научные организации и заводы практически всех республик Советского Союза, а также создание в Научном Центре Академии наук (пос. Черноголовка) Института структурной макрокинетики. Вскоре в разных городах страны появились самостоятельные «точки», такие как Научно-учебный центр СВС (МИСиС-

ИМАН, г. Москва), Томский филиал ИСМАН (теперь Отдел структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН), Инженерный центр СамГТУ (г. Самара), организовались творческие коллективы в Ереване, Киеве, Тбилиси, Минске, Алма-Ате и других городах страны. Основной задачей МНТК «Термосинтез» была разработка и создание на основе СВС-технологий промышленного производства, обеспечивающего российских потребителей сырьем для изготовления изделий из новых материалов, без которых не обходится практически ни одна отрасль хозяйства страны (авиация, космическая техника, электроника, атомная промышленность, сельское хозяйство и т.д.), а также новыми СВС-материалами и изделиями, полученными непосредственно в процессе горения. МНТК совместно с Госпланом СССР и Госкомитетом по науке и технике начал разработку грандиозной программы по СВС по переоснащению некоторых отраслей промышленности. Два года МНТК «Термосинтез» признавался лучшим среди МНТК и получал переходящее знамя. К сожалению, распад Советского союза и ликвидация МНТК сильно затормозили промышленное развитие технологий СВС. Начавшие активно работать, но еще не окрепшие республиканские опытные производства были брошены в «чужих» государствах и как малые дети, не могли устоять в то время, когда рушились даже такие гиганты, как твердосплавная промышленность, электроника и многое другое. Оставшись без финансовой и властной поддержки, необходимой для серьезной промышленной реализации новых технологий в масштабе страны, ИСМАН и другие творческие коллективы сосредоточили свои усилия на фундаментальных исследованиях особенностей синтеза материалов в режиме горения по сравнению с традиционными технологиями, способных обеспечить получение материалов с уникальными свойствами и отвечающих высоким требованиям, предъявленным к современным материалам и изделиям нового поколения. Можно привести примеры таких материалов, уже реализованные на практике. Так защитные покрытия на основе сложного СВС титан-хромового карбида, нанесенные на некоторые детали авиационных лопаток гражданских и военных самолетов увеличили ресурс работы этих деталей в десятки раз при повышении износостойкости до 80 раз по сравнению с традиционными покрытиями из карбида вольфрама и карбида хрома. Подробно изучая эти особенности и структуру нитридной керамики, описанной выше, исследователи пришли к выводу, что процесс горения в роли «создателя» (а не «разрушителя», как все привыкли его видеть), преподнес еще один сюрприз. Благодаря экстремальным температурным, скоростным условиям синтеза и разнообразию условий последующего остывания продуктов (естественное, с закалкой, с подогревом и т.д.), формирование конечных целевых продуктов на первых стадиях горения происходит в т.н. «неравновесных условиях» с образованием «первичных»

наноразмерных частиц, фракталов, самоорганизованных наноструктур, дальнейшая судьба которых зависит от условий остывания продуктов горения. В естественных условиях и при больших объемах реакционных масс частицы подвергаются рекристаллизации в крупные (чаще всего от 1 до 20-30 микрон) агломераты, характерные для соединений, синтезированных в условиях печного синтеза. При ускоренной кристаллизации и остановке процесса горения сразу после образования продуктов сохраняются наноразмерные и ультрадисперсные порошкообразные соединения, которые могут быть выделены и использованы в качестве эффективного сырья для изготовления изделий, различных добавок, присадок и т.д. Методы получения и выделения нано- и ультрадисперсных порошков карбидов, боридов, силицидов титана, вольфрама, молибдена, а также нитридов бора, кремния, алюминия уже разработаны и используются в настоящее время. В условиях совмещения процесса горения с механическим прессованием, газостатированием или другими физическими воздействиями первичные наночастицы могут сохраняться в виде отдельных компонентов синтезируемого материала и служить либо дисперсноупрочняющими элементами, либо наноструктурированными фрагментами данного материала, обеспечивающими его уникальные свойства. Именно такие структуры имеют СВС-материалы с повышенной коррозионной и термостойкостью, высокими значениями износостойкости и прочности. В настоящее время это направление стало одним из ведущих в ИСМАНе. Что касается использования уже созданных и отработанных в рамках опытно-промышленных производств СВС-технологий, то они добросовестно выполняют роль поставщиков порошкового сырья, опытных партий конкретных материалов и изделий для многих потребителей России, связавших свою судьбу с нелегкой научно-технической областью создания материалов и изделий нового поколения. По производству некоторых соединений ИСМАН является монополистом. Практически не имеющие российской базы, потребители довольны качеством СВС-продукции, поставляемой технологическими подразделениями Института Академии наук. Создание промышленного чисто отечественного современного СВС-производства с автоматизацией отдельных стадий, к сожалению, пока так и остается мечтой, несмотря на неоднократные обращения разработчиков в различные государственные структуры, в том числе Миннауки, Депутатский корпус, Роснано. Чиновники с их бюрократическим формализованным подходом к рассмотрению предложений, по-видимому, просто не способны вникнуть в насущные проблемы промышленности, ни оценить истинное значение престижных достижений российских ученых, руководствуясь зачастую формальными показателями или чужим, не всегда объективным мнением.

Очень интересна история «вхождения» в СВС (SHS – Self-Propagating High-Temperature Synthesis, Combustion Synthesis) наших зарубежных коллег. Некоторое время после появления первых публикаций по СВС было полное молчание, которое, как потом стало понятно, было связано с «пугающим» словом «горение». Первым толчком к началу исследований в 80-х годах в США, а затем в Японии, Франции, Испании, Италии, Китае, Южной Корее, Тайване был обзор сотрудника Информационного центра армии США Джойя Крайдера «Самораспространяющийся высокотемпературный синтез – советский метод получения керамических материалов», после этого начался «СВС-бум». К настоящему времени это направление подхватило более 50 стран мира, проведено 12 Международных симпозиумов (в разных странах), выпускается международный журнал по Самораспространяющемуся высокотемпературному синтезу (The International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis). Направленность работ в разных странах различна. В США, Англии, Японии в основном проводятся фундаментальные исследования и созданы некоторые производства. Скорее всего, высокий технический уровень существующих традиционных производств в этих странах и солидные имена и марки фирм, выпускающих подобную продукцию, не позволяют впустить на мировые рынки продукцию российских технологий (в чем мы частично убедились при проведении работ в Испании в рамках американо-испано-российского сотрудничества по адаптации СВС-технологий и СВС-продуктов к западному сырью, санкционированных Академией наук в 1993 году). Тем не менее нам известно, что в США по технологии СВС производятся нанопорошки тугоплавких соединений, например, диборида титана, в Англии в заводском масштабе получают порошки композиционных твердосплавных карбидов, в Японии порошки силанов и др. Но особенно преуспевают Китай, Южная Корея, Тайвань. В Китае при мощной государственной финансовой поддержке практически в каждом университете и научно-исследовательском институте организованы СВС-группы или СВС-лаборатории, работают производства (в том числе коммерческие) порошков разного назначения, в том числе наноразмерных, построено 2 больших завода по производству СВС-методом коррозионностойких труб для перекачки агрессивных жидкостей и газов в объеме 10 тыс. тонн в год. В Интернете представлено больше миллиона ссылок на публикации в области СВС в самых разных областях науки и техники, о которых авторы открытия даже не могли предположить. Остается радоваться только тому, что, как показывают проведение 12 Симпозиумов, а также многочисленные публикации и личные общения, все зарубежные «последователи» СВС признают лидерство российских ученых. Рожденная из чисто фундаментальных исследований в стенах Академии наук, отечественная технология приобрела мировое значение, а сам СВС

давно уже перестал быть просто методом синтеза неорганических соединений, а вырос в большую самостоятельную область знания, возникшую на стыке науки о горении и материаловедения.