



ТАВАДЗЕ
Гіоргій Фердинандович — академік НАН Грузії, директор Інституту металургії та матеріалознавства імені Фердинанда Тавадзе НАН Грузії, лауреат Золотої медалі НАН України імені В.І. Вернадського

ПРО РОЗВИТОК НАПРЯМУ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО САМОПОШИРЮВАНОВОГО СИНТЕЗУ

Доповідь з нагоди вручення Золотої медалі
ім. В.І. Вернадського НАН України

Глибокоуважаемый Борис Евгеньевич!
Глибокоуважаемые коллеги!

Разрешите выразить мое персональное и особое уважение Национальной академии наук Украины и глубокую благодарность тем украинским научным центрам, где учились, повышали квалификацию, защищали кандидатские и докторские диссертации более двух десятков моих коллег — металлургов и материаловедов из нашего Института, в том числе и я. Разрешите также выразить искреннюю благодарность за столь высокую оценку моей деятельности, отмеченную Золотой медалью НАН Украины имени В.И. Вернадского. Думаю, что эта высокая награда принадлежит не только мне, но и моим коллегам, моим учителям и ученикам из Института металлургии и материаловедения имени Фердинанда Тавадзе, вместе с которыми мы отстаивали наш Институт в тяжелейшие для нашей страны годы.

Прежде чем перейти непосредственно к научному докладу, позвольте вкратце рассказать о нашем Институте и о его сегодняшнем состоянии.

Институт металлургии был основан в 1945 г. в системе АН Грузии. С 1951 г. и до самой смерти (1989 г.) его бессменно возглавлял академик Фердинанд Несторович Тавадзе. С 2000 г. Институт был переименован в Институт металлургии и материаловедения.

Институт металлургии был единственным в Закавказье исследовательским учреждением данного направления, что и определило его многопрофильность. В 1990 г. в его структуру входили 42 лаборатории, опытные производственные участки на Руставском металлургическом и Зестафонском ферросплавном заводах, общая численность сотрудников составляла 800 человек.

Научная тематика Института отличалась разнообразием, и в течение многих лет коллектив работал по следующим научным направлениям:

- изучение, освоение и подготовка к плавке металлургического сырья;
- уточнение и интенсификация существующих технологий металлургического производства и поиск новых процессов;
- разработка новых композиций сталей и сплавов, изучение физико-химических основ новых неорганических материалов;
- исследования в области химии и технологии высокочистых веществ; коррозии и защиты металлов; физической химии металлургических процессов; металлургии цветных, благородных и редких металлов; порошковой металлургии; самораспространяющегося высокотемпературного синтеза;
- исследования по истории металлургии Грузии.

В советский период Институт считался главной организацией при решении многих научно-технических проблем. В 1986 г. труды Института заслужили высочайшую оценку — переходящее знамя Академии наук СССР. Эта награда была отмечена личным поздравлением президента АН СССР академика Анатолия Петровича Александрова.

После распада СССР произошли большие политические и экономические изменения, Грузия стала независимой, существующие экономические связи были разрушены. Наука оказалась в состоянии стагнации, многие квалифицированные специалисты ушли из научных учреждений. В этих условиях Институту удавалось хоть как-то функционировать только за счет иностранных грантов и энтузиазма сотрудников.

В 2006 г. после проведения реформы в области образования и науки Институт был выведен из состава НАН Грузии и оказался в подчинении Министерства просвещения и науки. С этого момента изменилось и руководство Института, директором которого был избран ваш покорный слуга.

В этот сложный период, объединенные единой целью, мы направили всю энергию

на спасение Института. К счастью, огромный ресурс знаний, оставшийся с прошлых лет, в том числе и в сфере фундаментальных исследований, позволил нам выйти из критической ситуации. За счет внутренних ресурсов была проведена модернизация технических возможностей, активизированы некоторые научно-технологические направления, в частности работы по получению нанопорошков, специальных нанопорошковых и наноструктурных материалов. Началось возрождение коррозионной лаборатории и коррозионной станции в Батуми. После проведения реформ разработки Института были доведены до промышленных образцов. В итоге в таких областях, как создание специальных керамических и металлокерамических материалов, новых сталей, металлургия порошков, защита от коррозии, интеллектуальный продукт Института стал востребованным и попал в сферу интересов государства.

В 2011 г. Институт был передан в подчинение Министерства обороны и как независимая научно-исследовательская организация вошел в состав государственного научно-технического центра «Дельта».

Сегодня приоритетами для нас являются следующие направления: рациональное использование природных ресурсов, создание новых неорганических материалов, разработка экологически безопасной технологии утилизации-рециклирования отходов производства. В состав Института сейчас входит 8 лабораторий, которые в соответствии с профилирующими направлениями объединены в два отдела — металлургии и материаловедения. Общая численность сотрудников составляет 140 человек. Одновременно Институт выполняет экспертные работы.

Особо хочу отметить, что в этом году заканчивается строительство нового комплекса Института. За последние 50 лет строительство научно-исследовательского института в Грузии происходит впервые.

Теперь позвольте вкратце рассказать о моей научной деятельности. С самого начала отмечу, что еще на заре моей научной карьеры,

полвека назад, по рекомендации академика Фердинанда Несторовича Тавадзе я начал заниматься получением метастабильных фаз сверхбыстрой закалкой из жидкого состояния и процессами самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

Работы по изучению процессов СВС начались в нашем Институте в 1970-х годах. Открытие явления твердопламенного горения сразу же привлекло наше внимание. Мы установили научные контакты с профессором Александром Григорьевичем Мержановым, и это сотрудничество, безусловно, имело огромное влияние на развитие самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

Исходным, а в ряде случаев и целевым, продуктом в процессах СВС являются зернистые материалы в виде металлических и неметаллических порошков разного происхождения.

Если следовать академику Вернадскому и глобально присмотреться в структурном аспекте к окружающему нас неорганическому миру, легко обнаружим, что материя в природе существует в основном или в виде кристаллической регулярной решетки (разнообразные минералы, металлы, сплавы и др.), или в виде неупорядоченной нерегулярной субстанции (жидкости, аморфные вещества, зернистые материалы и т.д.). В то же время атомистическая модель структуры материи, согласно которой атомы рассматриваются как жесткие сферы, с одинаковым успехом применяется и для регулярных и для нерегулярных, неупорядоченных структур. Поэтому не случайно, что исследованию свойств зернистых сред, в частности порошков металлургического происхождения, уделяется особое внимание.

В моей монографии «Получение специальных материалов методами самораспространяющегося высокотемпературного синтеза» (2011), написанной вместе с профессором А.С. Штейнбергом, исследованию свойств порошковых материалов (структура, плотность укладки, фильтрация и т.д.) посвящена значительная часть. Отмечу, что в 2013 г. эта книга была переиздана на английском языке в США, а в 2016 г. — на китайском языке в Китае и по

просьбе китайских коллег дополнена новыми результатами, полученными после 2011 г.

В нашем Институте были развиты три разновидности самораспространяющегося высокотемпературного синтеза: СВС с восстановительной стадией; СВС-прессование; СВС-литье/металлургия. Параметры СВС зависят от множества факторов. Главными среди них являются термодинамические характеристики: теплота образования синтезированного соединения, теплоемкость участвующих в реакции элементов, дисперсность порошков, плотность брикета, теплопроводность и др. Особый интерес для меня представляет вопрос влияния дисперсности реагирующих компонентов на СВС.

В Институте профессором Д.В. Хантадзе разработана структурная модель неупорядоченной системы, основанная на гипотезе Дж. Бернала, согласно которой нерегулярное, случайное расположение частиц в пространстве полностью исключает наличие элементов симметрии, характерных для кристаллических решеток. Модель использует результаты систематического исследования нерегулярного заполнения пространства стальными шариками (приближение жесткой сферы) и математическую теорию расположения. Она успешно применяется при обсуждении свойств зернистых сред, в частности для характеристики порошков, используемых в СВС.

С учетом структурных моделей зернистых сред мы установили, что гетерогенные контакты, образуемые в изначальной смеси металлических и неметаллических частиц, определяют ход процесса СВС — чем больше число разноименных (гетерогенных) контактов, тем эффективнее протекает реакция. Число контактов определяет параметры СВС и фазовый состав, полученный в результате горения. На примере сплавов титана и бора экспериментально показано влияние гранулометрического состава изначальной шихты на свойства фаз продуктов, полученных методом СВС.

Хочу отметить, что при помощи СВС с восстановительной стадией возможен синтез таких соединений, которые невозможно

получить непосредственно от реагирующих элементов из-за слабой экзотермичности реакции. Например, реакция получения карбида бора непосредственно из элементов характеризуется малой экзотермичностью и не происходит обычным СВС ($4\text{B} + \text{C} \rightarrow \text{B}_4\text{C} + 9,3 \text{ ккал/моль}$), однако протекает другая реакция ($2\text{B}_2\text{O}_3 + 6\text{Mg} + \text{C} = \text{B}_4\text{C} + 6\text{MgO} + 269 \text{ ккал/моль}$), которая характеризуется высокой экзотермичностью. Были изучены системы $\text{KBF}_4\text{-Mg}$; $\text{KBF}_4\text{-Al}$; $\text{KBF}_4\text{-Mg-C}$; $\text{KBF}_4\text{-Al-C}$; $\text{KBF}_4\text{-Mg-N}_2$; $\text{KBF}_4\text{-Al-N}_2$. С помощью СВС с восстановительной стадией при участии KBF_4 нами получены: элементарный бор чистоты 99 %, с выходом конечного продукта $\approx 95\text{--}97\%$; карбид бора чистоты 99 %, с выходом конечного продукта $\approx 96\text{--}97\%$. Из KBF_4 , обогащенного изотопным бором, получены ^{10}B , ^{11}B с их последовательным обогащением. В результате проведенных исследований из ангидрида бора, борной кислоты и их смеси были синтезированы элементарный бор, карбид бора и нитрид бора.

Вторая разновидность — метод СВС-прессования, или СТИМ-технология, подразумевает последующую, после СВС, обработку продуктов горения давлением для доведения заготовки до компактного состояния. При этом пористость конечного продукта $< 1\%$. Впервые была разработана новая группа твердых сплавов, где твердой фазой являются порошки боридов металлов, а связующим — порошок металла соответствующего борида. Были установлены оптимальные параметры процесса (время задержки прессования, время прессования, сила прессования), которые определяют высокие эксплуатационные свойства твердого сплава и возможность получения в одной стадии твердых сплавов с металлическим бандажом.

С применением третьей разновидности, СВС-плавления, синтезированы металлические сверхпроводящие соединения класса $\text{A15:Nb}_3\text{Ge}$, Nb_3Sn , Nb_3Al ; NbAl-Ge и высокотемпературный сверхпроводящий материал на основе эрбия $\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,69}$.

В результате проведенных исследований и полученных сверхпроводящих материалов с

применением энергии взрыва была разработана технология получения токопроводящих сверхпроводящих изделий, на основе которой наш Институт совместно с Институтом атомной энергии им. И.В. Курчатова начали изготавливать макеты сверхпроводящих магнитных обмоток, предназначенных для международного проекта Токамак.

Перехожу к работе, к которой хочу привлечь ваше особое внимание. Это метод получения многокомпонентных композиционных керамических и металлокерамических материалов. К ним относятся и функционально-градиентные материалы. В этой сфере мы впервые применили в совокупности методы СВС с восстановительной стадией и СВС-прессования.

Известно, что одним из путей повышения эксплуатационных характеристик композиционных материалов является создание материалов с дифференцированными составами и свойствами в объеме. Перспективность такого материала в том, что в одном изделии собраны сплавы или соединения разных составов и с разными свойствами. Они обуславливают способность изделия проявлять то или иное требуемое свойство по разным направлениям. С выбором соответствующих фаз композиционный материал становится менее чувствительным по отношению к концентраторам напряжения, не трескается, устойчив при знакопеременных динамических и долгосрочных нагрузках. В композиционных материалах выбор составляющих фаз позволяет создавать материалы с заранее заданными свойствами, такими как прочность, жесткость, термическая стойкость и химическая устойчивость.

С помощью высокотемпературных химических реакций (СВС-технологий) получены различные композиционные порошки.

1. $\text{B}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Al} + \text{C} \rightarrow \text{B}_4\text{C} + \text{TiB}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + 436 \text{ ккал/моль}$, (2:1:7); (2200 °C);
2. $\text{B}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Al} + \text{Ti} + 2\text{B} \rightarrow \text{TiB}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + 297 \text{ ккал/моль}$, (5:5);
3. $\text{B}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Al} + \text{C} + \text{B}_4\text{C} \rightarrow \text{B}_4\text{C} + \text{SiC} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 245 \text{ ккал/моль}$, (2:1:7); (1850 °C);

4. $B_2O_3 + TiO_2 + Al + C \rightarrow B_4C + TiB_2 + Al_2O_3 + 523 \text{ ккал/моль, (4,5:4,5)}$;
5. $B_2O_3 + TiO_2 + Al + C + Cu \rightarrow B_4C + Al_2O_3 + Cu + 375 \text{ ккал/моль (1736 } ^\circ\text{C)}$;
6. $B_2O_3 + TiO_2 + Ti + 2B + Al + C \rightarrow B_4C + TiB_2 + Al_2O_3 + 208 \text{ ккал/моль, (3:2:5); (2410 } ^\circ\text{C)}$.

В полученных материалах возможно в широком диапазоне варьировать фазовый состав порошков, например B_4C – 10–45 %; TiB_2 – 10–60 %; SiC – 10–20 %; Al_2O_3 – 40–70 %. В результате химической реакции продукт получается в спеченном состоянии. Он легко поддается измельчению в виде фракций класса абразивных микропорошков.

Основываясь на проведенных исследованиях, мы поставили цель – получить керамический броневой материал, который отличался бы малым весом, высокими физико-механическими свойствами, высокой баллистической стойкостью, технологичностью и низкой ценой, что значительно отличало бы его как от металлической брони, так и от известных керамических бронематериалов. В результате нами был получен композиционный

Некоторые физико-механические характеристики бронеплит, полученных методом СВС-прессования

Параметры	$B_4C \cdot TiB_2 \cdot Al_2O_3$ (2:1:7)	$B_4C \cdot TiB_2 \cdot Al_2O_3$ (3:2:5)
Модуль Юнга, Е, ГПа	410 ГП 400	425 ГП 411
Коэффициент интенсивности разрушения, K_{IC} , МПа·м ^{0,5}	13,2 ГП 9,8	13,7 ГП 10,6
Твердость, НВ, кг/мм ²	2670 ГП 2650	2850 ГП 2800
Плотность, ρ , г/см ³	3,45 ГП 3,54	3,48 ГП 3,40
Прочность на дробление, σ_{mc} , ГПа,	4,7 ГП 3,2	5,2 ГП 3,8
Пористость, %	3–6 ГП 4–5	3–6 ГП 3–5

керамический бронематериал с фазовым составом $B_4C \cdot TiB_2 \cdot Al_2O_3$ под кодовым названием «Тори». Эта работа впоследствии была отмечена Государственной премией Грузии.

В таблице приведены некоторые физико-механические характеристики бронеплит, полученных методом СВС-прессования. Они значительно превосходят физико-механические характеристики горячепрессованных карбида бора, окиси алюминия и т.д.

Хочу представить также некоторые работы по СВС, начатые нами в Институте в 2016 г. Впервые, это работы по созданию новой энергоэффективной технологии получения неметаллических и интерметаллических материалов. Эта технология совмещает электрорезонансное облучение и самораспространяющийся высокотемпературный синтез. Инновация состоит в том, что для инициирования процесса применялось микроволновое электрорезонансное воздействие на шихту. Результат наглядно виден в период «инкубации» – выделение газов при подогреве начальной шихты, самоочистка и на последнем этапе объемное горение. При этом скорость горения возрастает не менее, чем на порядок, полученный продукт однороден, равномерно нагрет и намного лучше поддается процессу компактирования.

С помощью этой технологии возможно получение как порошковых материалов в виде нано- и микропорошков, так и композиций в режиме СВС-компактирования. В результате с практически нулевыми энергозатратами получаем дорогостоящую продукцию промышленного назначения: конструкционную керамику, твердые сплавы, броневые материалы и т.д.

Применение этого метода нагрева в процессе СВС выводит возможности синтезирования материалов на совершенно новый уровень. В результате теоретического анализа было установлено, что таким методом можно синтезировать и низкоэнергетические материалы, которые обычно не горят.

В другой работе используется разработанная в Институте оригинальная технология электропрокатки, в процессе которой режим нагрета

ва локализован и осуществляется при помощи подачи электроэнергии непосредственно в очаг деформации. Деформация происходит в условиях постоянного теплового режима, и с окончанием прокатки нагревание прекращается.

Был разработан комбинированный инновационный технологический процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и электропрокатки, который обеспечивает получение высококачественных материалов (в том числе градиентных материалов). Наполненный шихтой контейнер подается на вращающиеся валки специального прокатного стана. Происходит легкий захват контейнера и валки приостанавливаются. В очаг деформации через валки на контейнер подается электроэнергия, что в начальном срезе очага деформации вызывает иницирование процесса СВС. После создания определенной зоны горения в шихте, находящейся в контейнере, подается электроэнергия. Необходимое

условие непрерывной деформации — равенство скоростей прокатки и фронта горения, а также компенсация тепловых потерь, что обеспечивается подбором нагревающего тока в очаге деформации.

Научное направление, которое называется самораспространяющимся высокотемпературным синтезом, сегодня во многих странах мира признано одним из наиболее интересных и приоритетных направлений. Сегмент материаловедения, основанный на описанных мною химических технологиях, продолжает интенсивно развиваться в нашем Институте. Местом проведения XIV международного симпозиума по СВС, который состоится в сентябре 2017 г., был избран г. Тбилиси, а именно, Институт металлургии и материаловедения имени Фердинанда Тавадзе. Буду рад видеть среди участников и гостей этого симпозиума наших украинских коллег.

Спасибо за внимание!