Основные научные результаты лаборатории №9 за 2026 год

1. Получение крупногабаритной керамики TiB_2 методом СВС-компактирования

Методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза с последующим квазиизостатическим прессованием (СВС/QP) получены керамические диски из диборида титана диаметром 58 мм. Установлена немонотонная зависимость температуры и скорости горения смеси Ti + 2B от исходной относительной плотности прессовки. Исследовано влияние интенсивности смешения порошков титана и бора на электросопротивление заготовок, условия горения, плотность и структуру синтезированной керамики.

При оптимизации технологических условий достигнуты относительная плотность 95,5% (остаточная пористость 4,5%), средний размер зерен 2,8 мкм и предел прочности при сжатии 1320 МПа. Показано, что повышение температуры горения связано с уменьшением площади контакта между частицами титана; электрическое сопротивление исходной прессовки может служить показателем состояния межчастичных контактов. Результат подтверждает возможность получения относительно плотной мелкозернистой керамики TiB_2 крупного формата без длительного высокотемпературного спекания.

Таблица 1. Характеристики керамики TiB_2, полученной методом СВС/QP

Диаметр, мм	**Относительная плотность, %**	**Средний размер зерен, мкм**	**Прочность при сжатии, МПа**
58	95,5	2,8	1320



Рисунок 1 – Образец синтезированной керамики TiB_2.

Литература

1. V.A. Shcherbakov, Yu.V. Bogatov. Synthesis of Large-Scale TiB_2 Ceramics by the SHS/QP Method. Ceramics International. Vol. 52. 2026. pp. 1499–1504. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.11.287

2. Влияние механической активации сажи на уплотнение и горение смесей Ti + C

Установлено, что механическая активация (МА) сажи разрушает ее арочную структуру и агломераты, повышая насыпную плотность более чем в три раза. При прессовании сажа проявляет свойства непластичного дисперсного материала с выраженным упругим последействием (до 14%). При относительной плотности смеси свыше 0,52 формируется несущий каркас из частиц титана, определяющий прочность исходной прессовки.

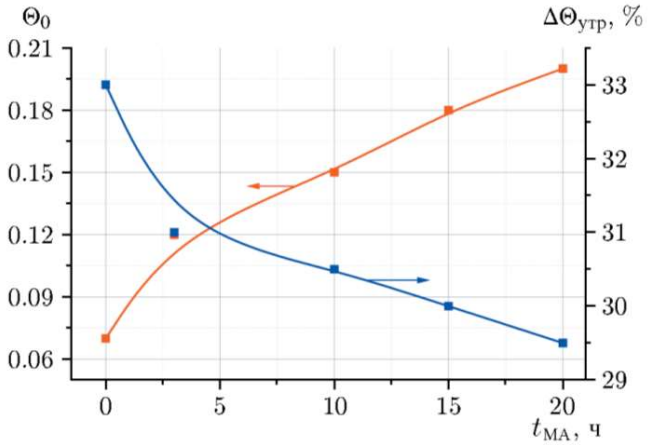


Рисунок 2 – Зависимость насыпной плотности и изменения плотности при утряске сажи от времени механической активации.

Выделены две области уплотнения: при давлениях до 50 МПа преобладает структурная деформация, а при более высоких давлениях начинается упругопластическая деформация. Для более дисперсной сажи при давлении около 50 МПа достигается относительная плотность прессовки 0,65. Зависимость температуры горения от плотности немонотонна: первоначально повышение контактной поверхности реагентов способствует росту температуры, а дальнейшее уплотнение, сопровождающееся усилением контактов Ti–Ti, приводит к ее снижению.

Показано, что увеличение продолжительности МА сажи повышает максимальную температуру горения смеси Ti + C. При дальнейшем росте давления прессования скорость горения снижается вследствие затруднения удаления примесных газов; образование расслойных трещин, напротив, способно резко увеличить скорость распространения реакции.

Таблица 2. Влияние МА сажи на максимальную температуру горения Ti + C

Состояние сажи	**Относительная плотность при Тмакс**	**Тмакс, °C**
Исходная	0,58	≈ 2900
МА 3 ч	0,63	≈ 3000
МА 20 ч	0,65	≈ 3200

Литература

1. Богатов Ю.В., Щербаков В.А. Влияние механической активации сажи на уплотнение и горение смесей Ti + C // Физика горения и взрыва, 2026, Т. 62, № 3, с. 143–155. https://doi.org/10.15372/FGV2025.9555

3. Структурная эволюция Ti–Zr-смесей при механической активации и синтезе (Ti,Zr)C

Исследована эволюция порошковой системы Ti–Zr при высокоэнергетической механической активации в среде гексана (2200 об/мин; продолжительность 5, 20, 40 и 60 мин) с последующим СВС-компактированием карбидной керамики. По данным рентгеновской дифракции и электронной микроскопии, на начальных стадиях обработки (5–20 мин) преобладают пластическая деформация, измельчение областей когерентного рассеяния и накопление дефектов; объемный твердый раствор Ti–Zr, обнаружимый методом РФА, не формируется. Локальные нанокристаллические области взаимодействия Ti и Zr при этом не исключаются.

После 60 мин активации наблюдались структурные признаки, согласующиеся с образованием кубической фазы карбидного типа Ti–Zr при участии среды обработки. СВС-компактирование смеси после 60 мин МА обеспечило получение двойного карбида (Ti,Zr)C с субмикронной структурой и твердостью 18,5 ГПа. При меньшей длительности активации (5–40 мин) размеры зерен синтезированной керамики составляли ориентировочно 2–7 мкм. Результаты демонстрируют возможность регулирования фазообразования и дисперсности керамики выбором продолжительности МА.

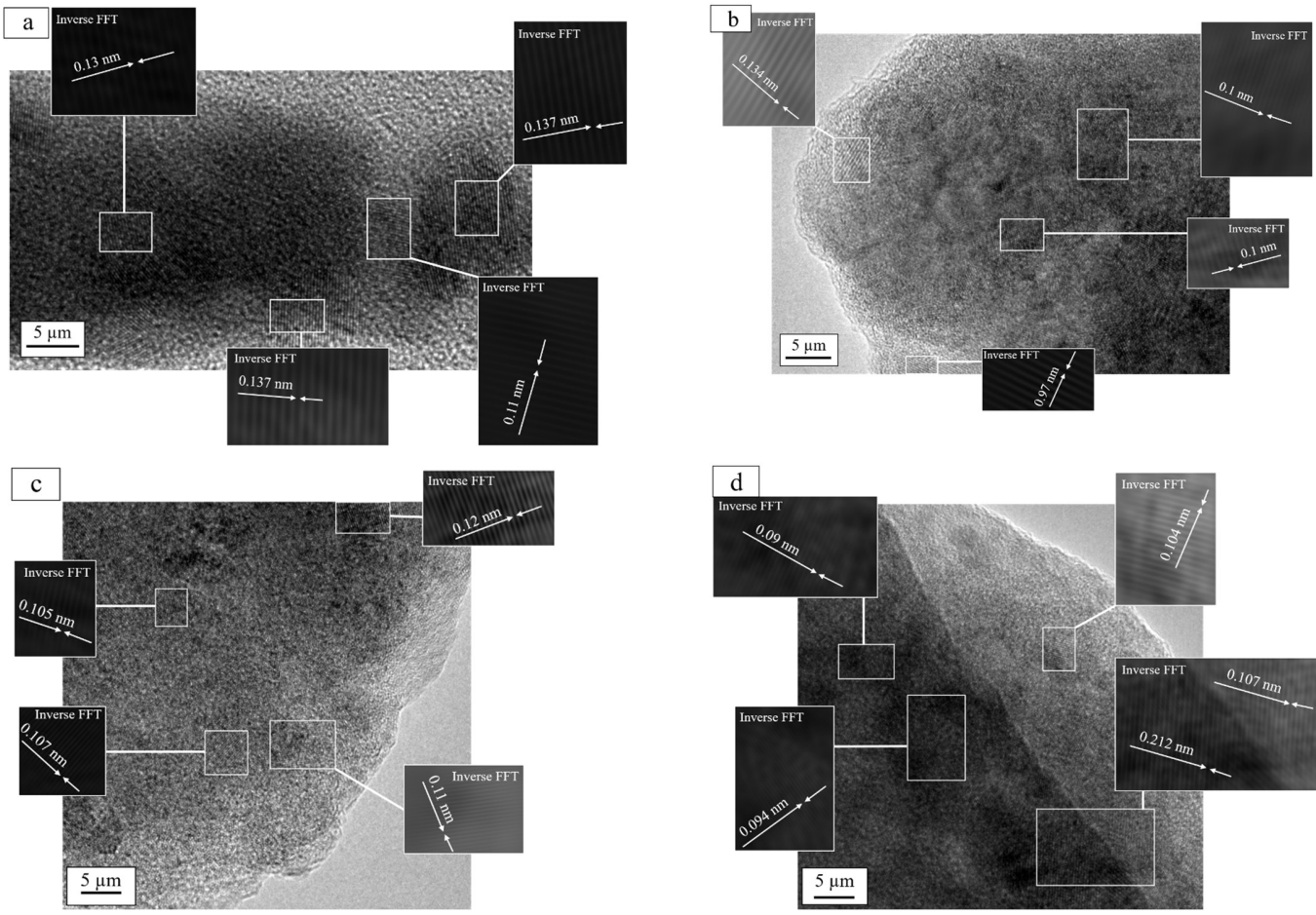


Рисунок 3 – ПЭМ-изображения смесей Ti–Zr после механической активации в течение (a) 5 минут, (b) 20 минут, (c) 40 минут и (d) 60 минут.

На рисунке 3 (a–d) представлены микрофотографии образцов после механической активации в течение 5, 20, 40 и 60 минут соответственно, с результатами быстрого Фурье-преобразования (БФП) для локальных областей. Рассчитанное значение межплоскостного расстояния d ≈ 0.212 нм хорошо согласуется с литературными данными для плоскости {200} кубической решётки карбидов титана (TiC: d_{200} ≈ 0.216 нм) и циркония (ZrC: d_{200} ≈ 0.235 нм). Появление рефлекса, соответствующего этой плоскости, после 60 минут механической активации, а также формирование выраженной границы раздела свидетельствуют о протекании механохимического синтеза карбидной фазы в данных условиях.

Литература

1. I.E. Semenchuk, A.N. Gryadunov, V.A. Shcherbakov, I.V. Kozerozhets. Structural Evolution of Mechanically Activated Ti–Zr Mixtures during the Synthesis of (Ti,Zr)C Ceramics. Ceramics International. Vol. 52. 2026. pp. 32426–32435. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2026.05.282

4. Получение сферического порошка ультратугоплавкого карбида Ta_4HfC_5

Разработан и экспериментально реализован двухстадийный способ получения сферических порошков ультратугоплавкого карбида Ta_4HfC_5, включающий самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) керамического прекурсора с последующим измельчением и плазменной сфероидизацией. Впервые показана принципиальная возможность формирования сферических частиц карбида системы Ta–Hf–C с температурой плавления около 4215 °C. Установлено, что эффективность сфероидизации определяется размером исходных частиц: для фракции 10–50 мкм доля сферических частиц достигает 45–60%, тогда как частицы крупнее 60 мкм сохраняют преимущественно угловатую форму вследствие неполного проплавления. Выявлено влияние плазменной обработки на фазовый состав порошков, связанное с селективным испарением компонентов и образованием наноразмерных частиц. Определён оптимальный для дальнейшей отработки диапазон размеров исходного порошка 20–50 мкм.

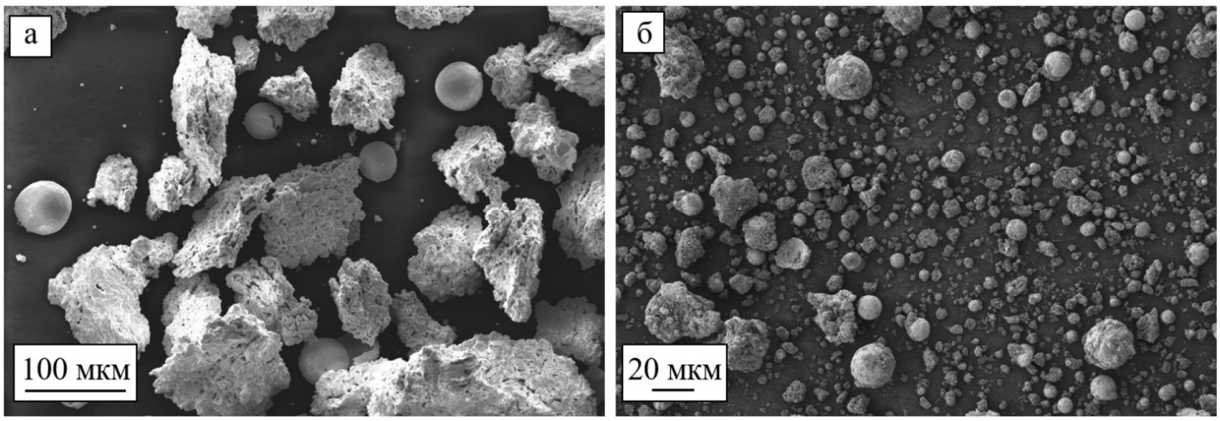


Рисунок 4 – Микрофотография сфероидизированного порошка, обработанного в потоке высокотемпературной аргоновой плазмы и собранного с дна (а) и стенок (б) плазменного реактора.

Предложенный способ открывает перспективы получения порошковых материалов для аддитивного производства и защитных покрытий, предназначенных для эксплуатации в экстремальных температурных условиях, в том числе в аэрокосмической технике.

Литература

1. I.E. Semenchuk, A.N. Gryadunov. Spherical Ultra-Refractory Carbide Ta_4HfC_5 Powder via Combined SHS and Plasma Spheroidization Approach. International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. Vol. 35. 2026. pp. 242–244. https://doi.org/10.3103/S1061386226700160

2. Семенчук И.Е., Грядунов А.Н., Фадеев А.А., Нигматуллина Г.Р., Самохин А.В., Щербаков В.А. Изменение морфологии и фазового состава порошка ультратугоплавкого карбида Ta_4HfC_5, синтезированного методом СВС, в процессе плазменной сфероидизации // Теплофизика высоких температур, 2026, № 5 (выходные данные требуют дополнения).

5. Обобщение научных основ синтеза сверхвысокотемпературных неорганических материалов

Подготовлена обзорная статья, посвящённая материаловедению высокотемпературных процессов горения и перспективным технологиям синтеза сверхтугоплавких керамических материалов. Систематизированы литературные сведения о тугоплавкости, жаростойкости и механических свойствах карбидов и боридов циркония, гафния и тантала, а также композиционных материалов на их основе. Рассмотрена роль добавок SiC и тугоплавких карбидов в формировании защитных оксидных слоёв и повышении стойкости к высокотемпературному окислению. Проанализированы закономерности формирования многокомпонентных твёрдых растворов, их фазовой устойчивости и возможного дисперсионного упрочнения при распаде. Особое внимание уделено электротепловому взрыву под давлением, сочетающему джоулев нагрев и экзотермическое взаимодействие реагентов. Показаны технологические преимущества объёмного нагрева и возможности регулирования теплового режима синтеза для получения плотной керамики с заданными свойствами. Обзор формирует научную основу для разработки материалов тепловой защиты и высокотемпературных конструкционных изделий.

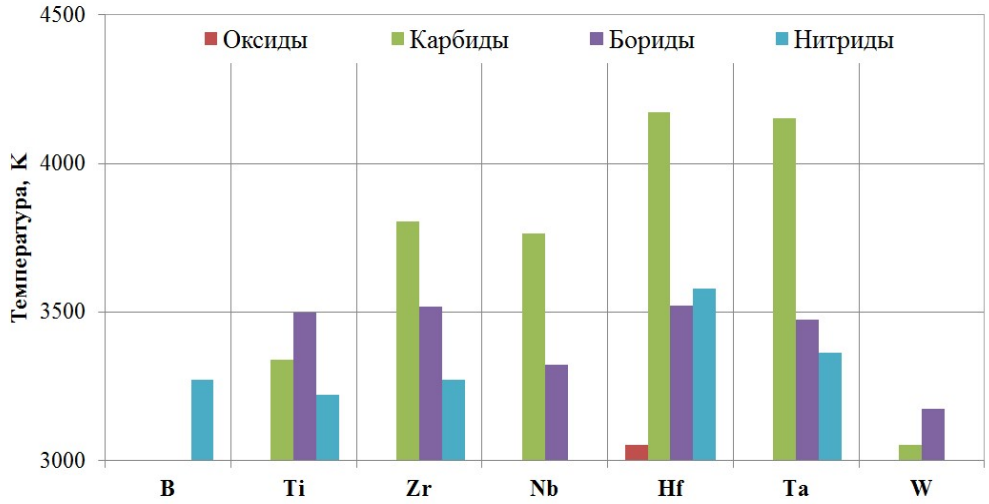


Рисунок 5 –. Температура плавления сверхвысокотемпературных керамических материалов.

Литература

1. Алымов М.И., Щербаков А.В. Материаловедение высокотемпературных процессов горения для технологии синтеза высокотемпературных неорганических материалов. Обзорная статья, рукопись (выходные данные публикации не представлены).