

УДК 536.46

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СВЯЗКИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА ГОРЕНИЕ В СИСТЕМЕ $(\text{Ti} + 2\text{B}) + (\text{Ti} + \text{C}) + x(\text{Fe} + \text{Co} + \text{Cr} + \text{Ni} + \text{Al})$

© 2025 г. Н. А. Кочетов*

*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им. А.Г. Мержанова Российской академии наук, Черногловка, Россия***E-mail: kolyan_kochetov@mail.ru*

Поступила в редакцию 26.12.2023

После доработки 18.04.2024

Принята в печать 22.04.2024

В работе проведено исследование влияния содержания металлической связки $\text{Fe} + \text{Co} + \text{Cr} + \text{Ni} + \text{Al}$ и механической активации (МА) на скорость горения, удлинение образцов в процессе синтеза, выход смеси и размер композитных частиц после МА, морфологию и фазовый состав продуктов горения активированных смесей в системе $(\text{Ti} + 2\text{B}) + (\text{Ti} + \text{C}) + x(\text{Fe} + \text{Co} + \text{Cr} + \text{Ni} + \text{Al})$. В процессе МА смесей образуется высокоэнтропийный сплав – твердый раствор на основе $\gamma\text{-Fe}$ с ГЦК-решеткой. Методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) получен композитный материал, состоящий из керамики и высокоэнтропийного сплава. Механическая активация увеличивает максимальное содержание металлической связки в смеси, при котором СВС осуществляется при комнатной температуре, от 60% до 80%. После МА возрастают удлинение образцов продуктов и скорость горения (в случае наличия металлической связки) смесей $(\text{Ti} + 2\text{B}) + (\text{Ti} + \text{C}) + x(\text{Fe} + \text{Co} + \text{Cr} + \text{Ni} + \text{Al})$. В случае смеси $(\text{Ti} + 2\text{B}) + (\text{Ti} + \text{C})$ без связки скорость горения уменьшается после МА. С ростом содержания металлической связки $\text{Fe} + \text{Co} + \text{Cr} + \text{Ni} + \text{Al}$ в смесях $(\text{Ti} + 2\text{B}) + (\text{Ti} + \text{C})$ увеличивается размер композитных частиц после МА, уменьшаются скорость горения, выход активированной смеси и удлинение образцов продуктов реакции МА-смесей. Для исходных смесей зависимость удлинения образцов продуктов горения от содержания связки не-монотонна, имеет максимум.

Ключевые слова: горение, механическая активация, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, высокоэнтропийный сплав, кермет, карбид и диборид титана.

DOI: 10.31857/S0207401X25010063

1. ВВЕДЕНИЕ

Материалы на основе TiB_2 и TiC востребованы благодаря таким свойствам, как высокие значения модуля упругости (более 450 ГПа) и твердости (более 25 ГПа), достаточно небольшие значения плотности (4.52 и 4.93 г/см³ соответственно), хорошая устойчивость к окислению и повышенным температурам [1–3]. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) дает возможность получить керамические материалы на основе карбида и диборида титана за одну технологическую операцию [3]. Горение порошковых смесей титана с бором исследовалось в работах – [4, 5], а титана с углеродом – в работах [6–10].

Для изменения реакционной способности и свойств порошковых смесей часто используется

метод механической активации (МА) [11–16]. Закономерности горения активированных порошков титана с углеродом исследовались в работах [17, 18], а титана с бором – в работах [19, 20].

Высокоэнтропийные сплавы (МВЭС), содержащие пять и более металлических компонентов, которые могут образовывать однофазный кристаллический сплав, являются новым классом материалов, обладающих уникальной микроструктурой и привлекательными свойствами [21–24]. Система $\text{Fe}–\text{Cr}–\text{Co}–\text{Ni}–\text{Al}$, относящаяся к семейству ВЭС на основе переходных 3d-металлов, вызывает интерес благодаря высоким значениям прочности на растяжение и пластичности [25], предельной деформации разрушения при пониженных и даже криогенных температурах [26],

прочности и твердости [27] и сверхпластичности [28].

Высокоэнтропийные сплавы получают следующими методами: индукционного плавления [21, 29], электродугового плавления в вакууме [30, 31], механического сплавления или механического активирования (МА) [32, 33] и др. Опубликованы работы, в которых для получения ВЭС используют метод СВС [20, 34, 35].

Широкое применение находят металлокерамические материалы, сочетающие в себе свойства металлических сплавов и керамики. Материалы на основе металлокерамики часто применяют в качестве высокотемпературных конструкционных материалов, режущего инструмента, износостойки материалов и т.д. [36–38]. Публикуются исследования, в которых в качестве связующего в металлокерамике используют ВЭС и получают такие материалы, как $\text{TiB}_2\text{--CoCrFeNiAl}$ [20, 39], $\text{TiB}_2\text{--CoCrFeNiTiAl}$ [40], $\text{TiB}_2\text{--TiC--CoCrFeNiTiAl}$ [41]. Предполагается, что эти материалы положили начало новому семейству металлокерамики [42].

В настоящей работе были поставлены следующие цели: синтезировать кермет с высокоэнтропийной связкой $\text{TiB}_2\text{--TiC--FeCoCrNiAl}$ методом СВС и исследовать влияние механической активации и содержания связки на процесс синтеза.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали порошок алюминия марки АСД-4 со средним размером частиц 10 мкм, порошок никеля марки НПЭ-1 со средним размером частиц 150 мкм, порошок карбонильного радиотехнического железа марки Р-10 со средним диаметром частиц 3.5 мкм, порошок хрома марки ПХ-1М с размером частиц менее 125 мкм, порошок кобальта марки ПК-1у с размером частиц менее 71 мкм, порошок бора черный, аморфный с размером частиц менее 1 мкм, порошок титана марки ПТМ-1 со средним размером частиц 120 мкм и порошок сажи марки П-803 дисперсностью 1–2 мкм.

В порошковую смесь $(\text{Ti}+2\text{B}) + (\text{Ti}+\text{C})$ состава 60 мас.%. $\text{Ti} + 2\text{B}$ и 40 мас.%. $\text{Ti} + \text{C}$ добавлялась высокоэнтропийная связка $\text{Fe}+\text{Co}+\text{Cr}+\text{Ni}+\text{Al}$ (все металлы связки в эквимольном соотношении, т.е. $\text{Fe} - 22.12$ мас.%, $\text{Co} - 23.34$ мас.%, $\text{Cr} - 20.6$ мас.%, $\text{Ni} - 23.25$ мас.%, $\text{Al} - 10.69$ мас.%).

Содержание связки варьировалось от 0 до 90 мас.%. Смеси порошков $(\text{Ti} + 2\text{B}) + (\text{Ti} + \text{C}) + x(\text{Fe} + \text{Co} + \text{Cr} + \text{Ni} + \text{Al})$ готовили путем перемешивания исходных компонентов в фарфоровой ступке в заданном количестве (значение x менялось от 0 до 90 мас. %). Связку $\text{Fe}+\text{Co}+\text{Cr}+\text{Ni}+\text{Al}$ для удобства будем обозначать как 5Ме.

Механическая активация порошковых смесей осуществлялась в механоактиваторе АГО-2 с водяным охлаждением при ускорении 90 g с использованием стальных шаров диаметром 9 мм в воздушной атмосфере. Соотношение массы шаров к массе порошка в барабанах активатора составляло 20:1, продолжительность активации – 5 мин.

Для исследования процесса горения из исходных и активированных порошков методом холодного двухстороннего прессования получали цилиндрические образцы диаметром 10 мм и высотой 12–17 мм. Масса образцов варьировалась от 2 до 4 г, давление прессования – 95–130 Кг/см². Масса образцов возрастала с увеличением содержания ВЭС в смеси для поддержания значений относительной плотности в интервале 0.56–0.6.

Процесс горения спрессованных образцов осуществлялся в камере постоянного давления в инертной среде аргона при давлении 760 Торр [11, 13, 15, 17, 19, 20, 34, 35]. Видеозапись процесса велась через смотровое стекло на видеокамеру. При покадровом просмотре видеозаписей процесса горения образцов определялась их скорость горения. Синтез инициировался нагретой вольфрамовой спиралью через поджигающую таблетку состава $\text{Ti} + 2\text{B}$ с верхнего торца образца для обеспечения стабильных условий зажигания. За относительное удлинение сгоревших образцов принималось отношение их высоты к высоте исходных образцов. Значения давления прессования, относительного удлинения и скоростей горения образцов, а также выхода смеси после МА определялись как средние по результатам нескольких экспериментов, погрешность определения не превышала 10%.

Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили на дифрактометре ДРОН-3 ($\text{Cu}(K_\alpha)$ -излучение).

Фракционный состав и распределение частиц смеси по размеру определяли по стандартной методике на лазерном анализаторе “Микросайзер-201С”. Погрешность измерений не превышала 1.2%.

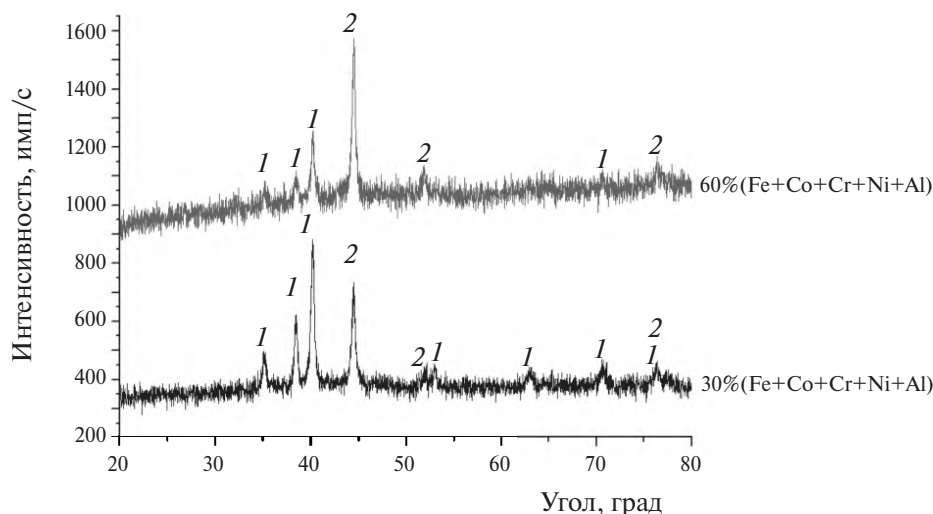


Рис. 1. Результаты РФА активированных смесей $(\text{Ti} + 2\text{B}) + (\text{Ti} + \text{C}) + x(5\text{Me})$, где $x = 30$ и 60 мас.%. Цифрами обозначены рефлексы следующих фаз: 1 – Ti, 2 – ГЦК-фаза (ВЭС).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рентгенофазовый анализ активированных порошков $(\text{Ti} + 2\text{B}) + (\text{Ti} + \text{C}) + x(5\text{Me})$ показал, что в процессе МА продолжительностью 5 мин образуется высокоэнтропийный сплав – твердый раствор на основе γ -Fe с ГЦК-решеткой (ВЭС). Также на рентгенограммах активированных смесей наблюдались рефлексы исходного титана (бор и сажа аморфны). Рефлексов отдельных металлов, входящих в состав связки (железа, кобальта, хрома, никеля и алюминия), не наблюдается, таким образом, можно сделать вывод о том, что переходные металлы сформировали ВЭС (рис. 1).

Часть порошка налипает (наклепывается) на стенки барабанов активатора и поверхность шаров в процессе МА [13, 20]. За выход смеси после активации примем отношение массы неналипшей активированной смеси, которую можно легко извлечь после МА из барабана, к массе исходной порошковой смеси, закладываемой в барабан перед МА. Добавление в активируемую смесь металлической связки 5Me, в которой присутствуют пластичные металлы, увеличивает налипание порошка в процессе МА на стенки барабанов и поверхность шаров. В результате с увеличением содержания металлической связки уменьшается выход смеси после МА (рис. 2).

В процессе МА частицы исходных компонентов деформируются, разрушаются и агломерируются между собой, формируя композитные частицы [13–16, 20]. С увеличением содержания металлической связки возрастает размер компо-

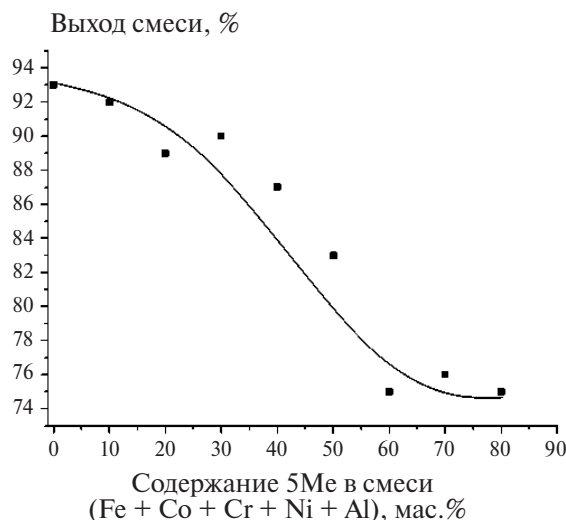


Рис. 2. Зависимость выхода активированной смеси от содержания металлической связки x в смеси $60\%(\text{Ti} + 2\text{B}) + 40\%(\text{Ti} + \text{C}) + x(5\text{Me})$.

зитных частиц активированной смеси $(\text{Ti} + 2\text{B}) + (\text{Ti} + \text{C}) + x(5\text{Me})$, однако это увеличение не превышает 12.5%: от 28 до 32 мкм (рис. 3).

В случае образцов, спрессованных из активированных смесей, уменьшаются значения давления прессования, прикладываемого для получения образцов данной плотности, что свидетельствует об улучшении уплотнения смесей с увеличением содержания металлической связки (рис. 4). Максимальное содержание металлической связки x , при котором удавалось инициировать горение спрессованных образцов, и образцы сгорали до конца, в случае исходных смесей $(\text{Ti} + 2\text{B}) + (\text{Ti} + \text{C}) + x(5\text{Me})$ составило 60 мас. %. Активация

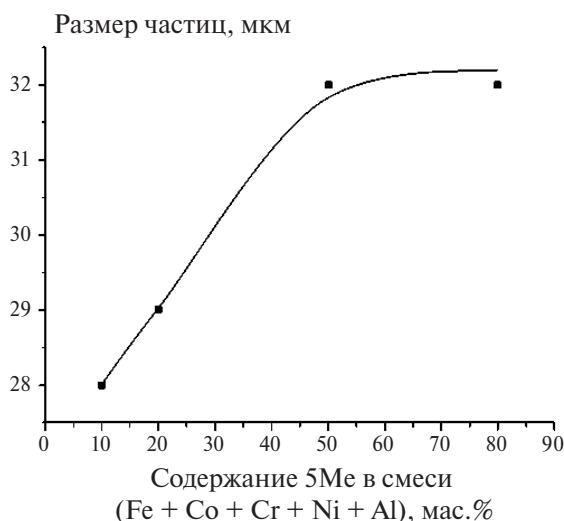


Рис. 3. Зависимость среднего размера частиц активированной смеси 60%(Ti+2B)+ 40%(Ti+C)+x(5Me) от содержания металлической связки x.

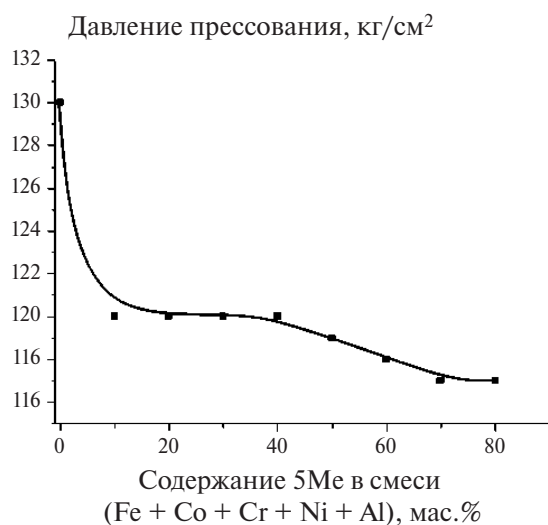


Рис. 4. Зависимость давления, используемого для прессования образцов из МА-смеси 60%(Ti+2B)+ 40%(Ti+C)+x(5Me) от содержания металлической связки в x.

увеличила предельное значение x, при котором осуществлялось горение, до 80%. Аналогичные результаты были получены ранее для системы (Ti+2B)+x(5Me) [20].

Зависимости измеренной экспериментально скорости горения образцов от содержания металлической связки 5Me для исходных и активированных порошков представлены на рис. 5. Видно, что для всех смесей скорость горения образцов уменьшается с увеличением содержания металлической связки в смеси. Данные тенденции ожидаемы, поскольку после добавления в смесь (Ti+2B)+(Ti+C) металлической связки, кроме

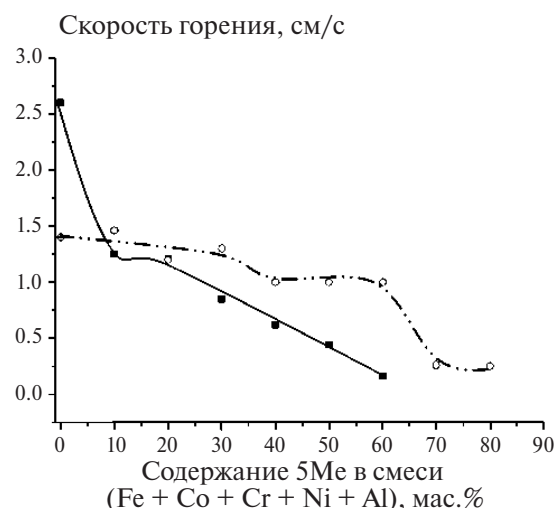


Рис. 5. Зависимость скорости горения образцов от содержания металлической связки: ■ – в исходной смеси 60%(Ti+2B)+ 40%(Ti+C)+x(5Me), ○ – активированной смеси 60%(Ti+2B)+ 40%(Ti+C)+x(5Me).

основных экзотермических реакций между титаном и бором и титаном и углеродом, происходит также плавление металлов с последующим образованием высокоэнтропийного сплава, которое не приводит к выделению значительного количества тепла.

Скорость горения МА-порошков превышает скорость горения исходных порошков в случае наличия в смеси 5Me. Причем это превышение возрастает с увеличением содержания металлической связки в смесях. Для смеси (Ti+2B)+(Ti+C) без связки скорость горения уменьшается после МА (рис. 5).

Ранее отмечалось, что в процессе МА в обрабатываемый порошок попадают дополнительные примесные газы [13, 15, 19, 20, 43, 44]. Выделение этих газов при горении образцов из МА-смесей приводит к их разрушению при содержании связки 50 мас.% и менее (рис. 6).

Часть примесных газов может выделяться перед фронтом горения, замедляя скорость его распространения, в соответствии с выводами конвективно-кондуктивной модели горения [45]. Таким образом, есть факторы, увеличивающие скорость горения смеси после МА (возрастание площади контакта и удаление диффузионных затруднений между компонентами активированной смеси), а также есть факторы, уменьшающие скорость горения после МА (увеличение количества примесных газов).



Рис. 6. Фотография образцов продуктов горения активированных смесей $60\%(\text{Ti}+2\text{B})+40\%(\text{Ti}+\text{C})+x(5\text{Me})$, при следующих значениях x : 1 – 0, 2 – 10, 3 – 20, 4 – 30, 5 – 40, 6 – 50, 7 – 60, 8 – 70, 9 – 80 мас. %.

Вероятно, в случае смеси $(\text{Ti}+2\text{B})+(\text{Ti}+\text{C})$ без связки, после МА преобладает воздействие фактора, понижающего скорость горения (т.е. возрастание примесных газов в активированном порошке). Это приводит к уменьшению скорости горения образцов после МА.

В случае порошков $(\text{Ti}+2\text{B})+(\text{Ti}+\text{C})+x(5\text{Me})$ с металлической связкой преобладает воздействие МА, увеличивающее скорость горения порошка после активации (возрастание площади контакта и удаление диффузионных затруднений между компонентами активированной смеси). В пользу этого свидетельствует уменьшение содержания примесных газов и максимальной температуры горения порошков $(\text{Ti}+2\text{B})+(\text{Ti}+\text{C})+x(5\text{Me})$ с увеличением содержания металлической связки. Ранее было установлено, что разбавление порошковых смесей $\text{Ti}+\text{C}$ и $\text{Ti}+2\text{B}$ металлами, не принимающими участия в экзотермической реакции (Fe , Co , Cr , Ni , Al , Cu) уменьшает количество примесных газов, выделяемых при горении этих порошков, и снижает их максимальную температуру горения [20, 34, 35, 46–50]. По данным РФА в продуктах горения активированных смесей наблюдаются лишь рефлексы фаз карбида и диборида титана, а также высокоэнтропийного сплава (рис. 7б). То есть добавку металлической связки 5Me в систему $(\text{Ti}+2\text{B})+(\text{Ti}+\text{C})$ можно рассматривать как инертную. В результате

для порошков $(\text{Ti}+2\text{B})+(\text{Ti}+\text{C})+x(5\text{Me})$ скорость горения после МА возрастает, и это возрастание увеличивается с ростом содержания 5Me (рис. 5).

Следует отметить, что при горении исходной смеси $\text{Ti}+2\text{B}+\text{Ti}+\text{C}$ без металлической связки в продукте наблюдаются рефлексы фаз TiB_2 и TiC . При добавлении связки на рентгенограммах продуктов как МА, так и исходных порошков появляются пики (рис. 7), соответствующие твердому раствору на основе $\gamma\text{-Fe}$ с ГЦК-решеткой (ВЭС), а также твердому раствору на основе $\alpha\text{-Fe}$ с ОЦК-решеткой (ВЭС).

Ранее отмечалось, что в процессе синтеза за фронтом горения часто происходит удлинение образцов из-за выделения примесных газов [13, 15, 20, 51–53]. При добавлении в исходный порошок $(\text{Ti}+2\text{B})+(\text{Ti}+\text{C})$ небольшого количества (10 мас. %) более легкоплавкой, по сравнению с TiB_2 и TiC , металлической связки увеличивается количество жидкой фазы во фронте горения, что приводит к увеличению удлинения образца в процессе горения (рис. 8). При дальнейшем увеличении количества металлической связки в исходной смеси, вероятно, начинает преобладать эффект снижения количества примесных газов и уменьшения максимальной температуры реакции, что приводит к уменьшению удлинения образцов продуктов реакции [20, 34, 35, 46–50] (рис. 8).

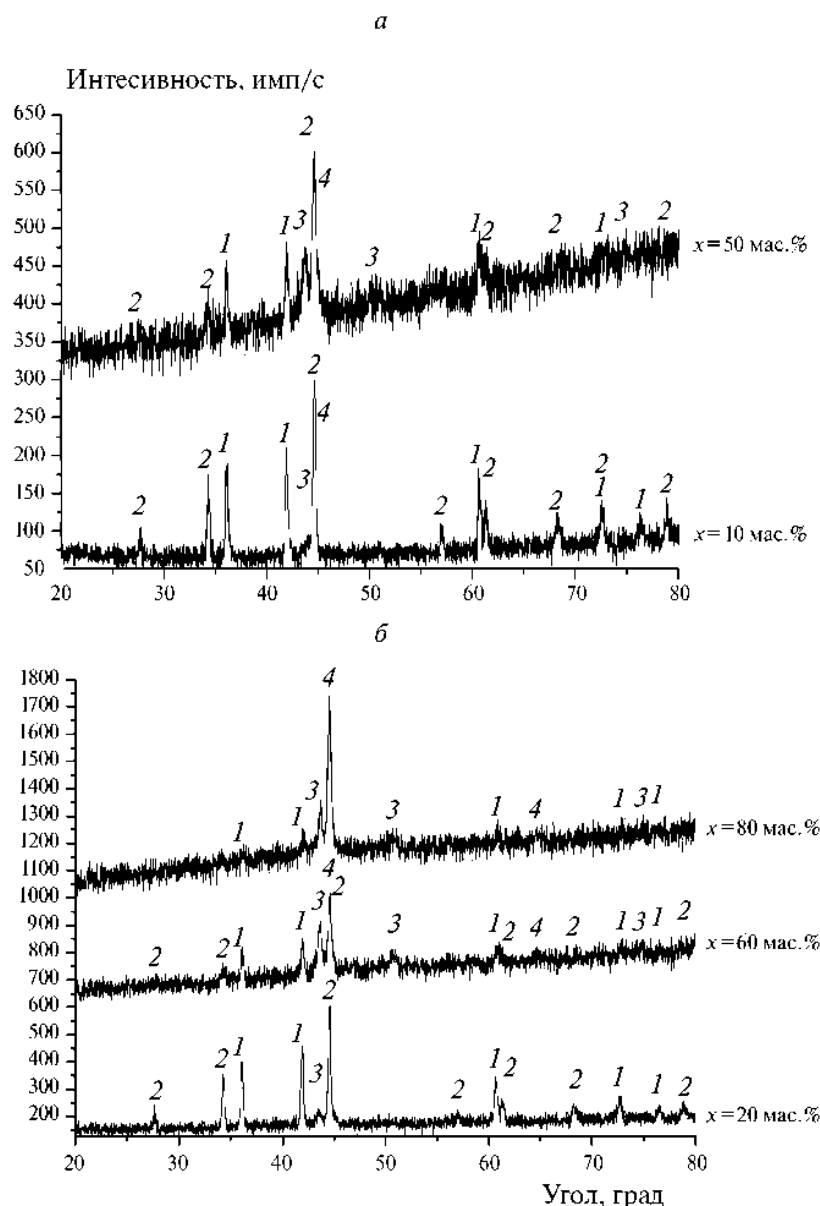


Рис. 7. Результаты РФА продуктов горения: *a* – исходных смесей, *б* – активированных смесей 60%(Ti + 2B) + 40%(Ti + C) + x (5Mc). При $x = 10$ и 50 мас. % для исходных и $x = 20$, 60 и 80 мас. % для активированных смесей. Цифрами обозначены рефлексы следующих фаз: 1 – TiC, 2 – TiB₂, 3 – ГЦК-фаза (ВЭС), 4 – ОЦК-фаза (ВЭС).

Как уже отмечалось выше, в процессе МА в обрабатываемые порошки вносятся дополнительные примесные газы. Выделение этих газов при горении образцов из активированных смесей приводило к их разрушению (рис. 6). Лишь при содержании металлической связки в МА-смесях 60 мас. % и более продукты реакции сохраняли целостность, что позволило измерить их удлинение (рис. 8). Образцы продуктов синтеза исходных порошков, содержащие меньше примесных газов, по сравнению с активированными смесями, сохраняли целостность при всех

значениях содержания металлической связки (рис. 9).

Видно, что удлинение образцов продуктов горения активированных порошков значительно превышает удлинение образцов продуктов горения исходных смесей. Кроме того, удлинение образцов продуктов МА-порошков, так же как и в случае исходных смесей, уменьшается с увеличением содержания в смесях металлической связки из-за снижения количества примесных газов и уменьшения максимальной температуры реакции (рис. 8).

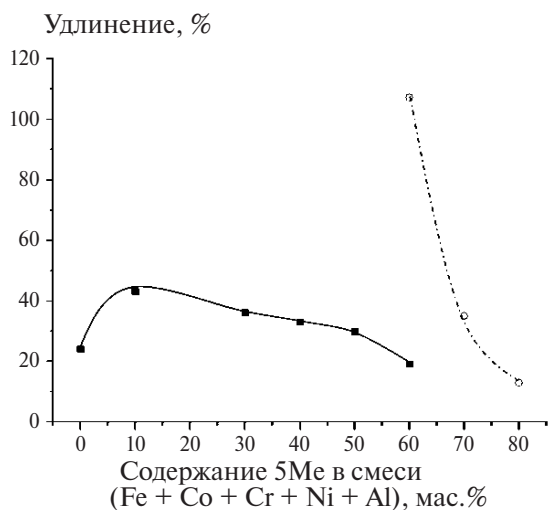


Рис. 8. Зависимость относительного изменения длины образца от содержания металлической связки: ■ — в исходной, ○ — в активированной смеси 60%(Ti+2B)+40%(Ti+C)+x(5Me).

Результаты данной работы могут использоваться для оптимизации получения керметов на основе МВЭС.

4. ВЫВОДЫ

1. В процессе МА порошков (Ti+2B)+ (Ti+C)+x(5Me) в течение 5 мин образуется высокоэнтропийный сплав — твердый раствор на основе γ -Fe с ГЦК-решеткой.

2. С увеличением содержания металлической связки 5Me в смесях (Ti+2B)+(Ti+C) увеличивается размер композитных частиц после МА, уменьшаются скорость горения, выход активи-

рованной смеси и удлинение образцов продуктов реакции МА-смесей. Для исходных порошков зависимость удлинения образцов продуктов горения от содержания связки немонотонна — имеет максимум.

3. Механическая активация увеличивает массовое содержание металлической связки 5Me в смеси (Ti+2B)+(Ti+C), при котором происходит горение образцов при комнатной температуре, до 80%.

4. После МА возрастает удлинение образцов продуктов горения и скорость горения (в случае наличия металлической связки) смесей (Ti+2B)+ (Ti+C)+x(5Me). Для смеси (Ti+2B)+(Ti+C) без связки скорость горения уменьшается после МА.

5. Методом СВС получен композитный материал, состоящий из керамики и высокоэнтропийного сплава.

Автор работы признателен И.Д. Ковалеву за рентгенофазовое исследование смесей и их продуктов синтеза, а также М.Л. Бусуриной за исследование распределения размера частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Basu B., Raju G.B., Suri A.K. // Intern. Mater. Rev. 2006. V. 51. № 6. P. 352.
<https://doi.org/10.1179/174328006X102529>
2. Vallauri D., Atías Adrián I.C., Chrysanthou A. // J. Eur. Ceram. Soc. 2008. V. 28. № 8. P. 1697.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.11.011>



Рис. 9. Фотография образцов продуктов горения исходных смесей 60%(Ti+2B)+40%(Ti+C)+x(5Me) при следующих значениях x: 1 — 0, 2 — 10, 3 — 20, 4 — 30, 5 — 40, 6 — 50, 7 — 60 мас. %.

3. Rogachev A.S., Mukasyan A.S. Combustion for Material Synthesis. N. Y.: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.
4. Hardt A.P., Phung P.V. // Combust. and Flame. 1973. V. 21. № 1. P. 77.
5. Hardt A.P., Holsinger R.W. // Ibid. P. 91.
6. Шкиро В.М., Боровинская И.П. // Процессы горения в химической технологии и металлургии. Черноголовка, 1975. С.253.
7. Сеплярский Б.С., Тарасов А.Г., Кочетков Р.А. // Физика горения и взрыва. 2013. Т. 49. № 5. С. 55.
8. Левашов Е.А., Богатов Ю.В., Миловидов А.А. // Там же. 1991. Т. 27. №1. С. 88.
9. Сеплярский Б.С., Вадченко С.Г., Костин С.В. и др. // Там же. 2009. Т. 45. № 1. С. 30.
10. Князик В.А., Мержанов А.Г., Соломонов Б.В. и др. // Там же. 1985. Т. 21. № 3. С. 69.
11. Кочетов Н.А., Сеплярский Б.С. // Хим. физика. 2020. Т 39. № 9. С. 39.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X20090058>
12. Корчагин М. А., Григорьева Т. Ф., Бохонов Б. Б. и др. // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39. № 1. С. 43.
13. Кочетов Н.А. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 7. С. 39–46.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X2207007X>
14. Корчагин М.А. // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51. № 5. С. 77.
<https://doi.org/10.15372/FGV20150509>
15. Кочетов Н.А., Сеплярский Б.С. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 1. С.42.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X22010071>
16. Корчагин М.А., Филимонов В.Ю., Смирнов В.Е. и др. // Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46. №1. С. 48.
17. Кочетов Н.А., Сеплярский Б.С. // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2017. № 3. С. 4.
<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2017-3-4-13>
18. Вьюшков Б.В., Левашов Е.А., Ермилов А.Г. и др. // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30. №5. С. 63.
19. Кочетов Н.А., Вадченко С.Г. // Физика горения и взрыва. 2015. Т.51. №4. С. 77.
<https://doi.org/10.15372/FGV20150410>
20. Кочетов Н. А. //Физика горения и взрыва. 2022. Т. 58. № 2. С. 49.
<https://doi.org/10.15372/FGV20220205>
21. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P. et al. // Mater. Sci. Eng., A. 2004. V. 375. P. 213.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
22. Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z. et al. // Prog. Mater. Sci. 2014. V. 61. P. 1.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>
23. Tsai M.-H., Yeh J.-W. // Mater. Res. Lett. 2014. V. 2. № 3. P. 107.
<https://doi.org/10.1080/21663831.2014.912690>
24. Chou H.-P., Chang Y.-S., Chen. S.-K. et al. // Mater. Sci. Eng., B. 2009. V. 163. № 3. P. 184.
<https://doi.org/10.1016/j.mseb.2009.05.024>
25. Gali A., George E.P. // Intermetallics. 2013. V. 39. P. 74.
<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.03.018>
26. Gludovatz B., Hohenwarter A., Catoor D. et al. // Science. 2014. V. 345. Iss. 6201. P. 1153.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1126/science.1254581>
27. Kilmametov A., Kulagin R., Mazilkin A. et al. // Scr. Mater. 2019. V. 158. P. 29–33.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.08.031>
28. Shahmir H., He J., Lu Z. et al. // Mater. Sci. Eng. A. 2017. V. 685. № 8. P. 342.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.01.016>
29. Gu J., Ni S., Liu Y. et al. // Ibid. 2019. V. 755. P. 289.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.04.025>
30. Bhattacharjee P.P., Sathiaraj G.D. et al. // J. Alloys Compd. 2014. V. 587. P. 544.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.10.237>
31. Yeh J.-W., Chen Y.-L., Lin S.-J. et al. // Mater. Sci. Forum. 2007. V. 560. P. 1.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.560.1>
32. Кочетов Н.А., Рогачев А.С., Щукин А.С. и др. // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2018. №. 2. С. 35.
<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2018-2-35-42>
33. Rogachev A.S., Vadchenko S.G., Kochetov N.A. et al. // J. Alloys Compd. 2019. V. 805. P. 1237.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.07.195>
34. Rogachev A.S., Vadchenko S.G., Kochetov N.A. et al. // J. Europ. Ceram. Soc. 2020. V. 40. P. 2527.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.11.059>
35. Rogachev A.S., Gryadunov A.N., Kochetov N.A. et al. // Intern. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. 2019. V. 28. № 3. P. 196.
<https://doi.org/10.3103/S1061386219030117>
36. Rajabi A., Ghazali M.J., Syarif J. et al. // Chem. Eng. J. 2014. V. 255. P. 445.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.06.078>
37. Rajabi A., Ghazali M.J., Daud A.R. // Mater. Des. 2015. V. 67. P. 95.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.081>
38. Peng Y., Miao H., Peng Z. // Intern. J. Refract. Met. H. Mater. 2013. V. 39. P. 78.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2012.07.001>
39. Zhang S., Sun Y., Ke B. et al. // Metals. 2018. V. 8. № 1:58. P. 1.
<https://doi.org/10.3390/met8010058>
40. Fu Z., Koc R. // Mater. Sci. Eng. A. 2017. V. 702. P 184.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.07.008>
41. Fu Z., Koc R. // Ibid. 2018. V. 735. P. 302.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.08.058>
42. de la Obra A.G., Avilés M.A., Torres Y. et al. // Intern. J. Refract. Met. H. Mater. 2017. V. 63. P. 17.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2016.04.011>
43. Vadchenko S.G. // Intern. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. 2016. V. 25. № 4. P. 210.
<https://doi.org/10.3103/S1061386216040105>
44. Vadchenko. S.G. // Ibid. 2015. V. 24. № 2. P. 90.
<https://doi.org/10.3103/S1061386215020107>

45. Сеплярский Б.С. // Докл. РАН. 2004. Т.396. № 5. С. 640.
46. Сеплярский Б.С., Кочетков Р.А., Лисина Т.Г. и др. // *Физика горения и взрыва*. 2023. Т. 59. № 3. С. 100.
<https://doi.org/10.15372/FGV20230309>
47. Сеплярский Б.С., Кочетков Р.А., Лисина Т.Г. и др. // *Хим. физика*. 2023. Т. 42. № 9. С. 11.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X23090108>
48. Сеплярский Б.С., Кочетков Р.А., Лисина Т.Г. и др. // *ЖФХ*. 2023. Т. 97. № 3. С. 438.
<https://doi.org/10.31857/S004445372303024X>
49. Seplyarskii, B.S., Kochetkov, R.A., Lisina, T.G. et al. // *Intern. J Self–Propag. High–Temp. Synth.* 2022. V. 31. P. 195.
<https://doi.org/10.3103/S1061386222040100>
50. Сеплярский Б.С., Абзалов Н.И., Кочетков Р.А., Лисина Т.Г. // *Хим. физика*. 2021. Т.40. № 4. С. 23.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X21030109>
51. Kamynina O.K., Rogachev A.S., Sytshev A.E. et al. // *Intern. J. Self–Propag. High–Temp. Synth.* 2004. V. 13. № 3. P.193.
52. Камынина О.К., Рогачев А.С., Умаров Л.М. // *Физика горения и взрыва*. 2003. Т. 39. № 5. С. 69.
53. Кочетов Н.А., Сеплярский Б.С. // *Хим. физика*. 2018. Т. 37. № 10. С. 44.
<https://doi.org/10.1134/S0207401X18100059>

THE EFFECT OF THE METAL BINDER CONTENT AND MECHANICAL ACTIVATION ON COMBUSTION IN THE (Ti + 2B) + (Ti + C) + x(Fe + Co + Cr + Ni + Al) SYSTEM

N. A. Kochetov*

Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science, Rus.Ac.Sci., Chernogolovka, Russia

**E-mail: kolyan_kochetov@mail.ru*

The paper investigates the effect of the content of the Fe + Co + Cr + Ni + Al metal binder and mechanical activation (MA) on the combustion rate, elongation of samples during synthesis, mixture yield and size of composite particles after MA, morphology and phase composition of combustion products and activated mixtures in the system (Ti + 2B) + (Ti + C) + x(Fe + Co + Cr + Ni + Al). In the process of MA mixtures, a multicomponent high-entropy alloy is formed – a solid solution based on γ -Fe with a HCC lattice (MHEA). A composite material consisting of ceramics and a high-entropy alloy was obtained by the method of self-propagating high-temperature synthesis (SHS). MA increases the maximum content of the metallic binder in the mixture, at which SHS is carried out at room temperature, from 60 to 80%. After MA, the elongation of the product samples and the combustion rate (in the case of a metal binder presence) of mixtures (Ti + 2B) + (Ti + C) + x(Fe + Co + Cr + Ni + Al) increases. For a mixture (Ti + 2B) + (Ti + C) without a binder, the combustion rate decreases after MA. With an increase in the content of the metal binder Fe + Co + Cr + Ni + Al in mixtures (Ti + 2B) + (Ti + C), the size of composite particles increases, the combustion rate, the yield of the activated mixture and the elongation of the samples of the reaction products of MA mixtures decreases. For the initial mixtures, the dependence of the elongation of the combustion product samples on the content of the binder is nonmonotonic, has a maximum.

Keywords: combustion, mechanical activation, SHS, multicomponent high-entropy alloy, cermet, TiB₂, TiC.

REFERENCES

1. B. Basu, G.B. Raju, A.K. Suri. *Int. Mater. Rev.* **51** (6), 352 (2006).
<https://doi.org/10.1179/174328006X102529>
2. D. Vallauri, I.C. Afías Adrián, A. Chrysanthou. *J. Eur. Ceram. Soc.* **28** (8), 1697 (2008).
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.11.011>
3. A.S. Rogachev, A.S. Mukasyan, *Combustion for Material Synthesis*. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.
4. A.P. Hardt, and P.V. Phung, *Combustion and Flame*. **21** (1), 77 (1973).
5. A.P. Hardt, R.W. Holsinger. *Combustion and Flame* **21** (1), 91 (1973).
6. V.M. Shkuro, I.P. Borovinskaya. Investigation of the combustion patterns of titanium-carbon mixtures. In the “Combustion processes in chemical technology and metallurgy”. Chernogolovka, 1975. [in Russian].
7. B.S. Seplyarskii, A.G. Tarasov, R.A. Kochetkov, *Combust. Explos. Shock Waves*. **49** (5), 555 (2013).
<https://doi.org/10.1134/S0010508213050079>
8. E.A. Levashov, Yu.V. Bogatov, & A.A. Milovidov, *Combust. Explos. Shock Waves*. **27** (1), 83 (1991).
<https://doi.org/10.1007/BF00785363>
9. B.S. Seplyarskii, S.G. Vadchenko, S.V. Kostin, G.B. Brauer. *Combust. Explos. Shock Waves*. **45** (1), 25 (2009).
<https://doi.org/10.1007/s10573-009-0004-x>
10. V.A. Knyazik, A.G. Merzhanov, V.B. Solomonov, A.S. Shteinberg. *Combust. Explos. Shock Waves*. **21** (3), 333 (1985).
<https://doi.org/10.1007/BF01463853>
11. N.A. Kochetov, B.S. Seplyarskii. *Russ. J. Phys. Chem. B* **14** (5), 791 (2020);
12. M. A. Korchagin, T.F. Grigor'eva, B.B. Bokhonov et al. *Combust. Explos. Shock Waves*. **39** (1), 43 (2003).
<https://doi.org/10.1023/A:1022145201911>
13. N.A. Kochetov. *Russ. J. Phys. Chem. B* **16** (4), 621 (2022).
<https://doi.org/10.1134/S1990793122040078>
14. M.A. Korchagin. *Combust. Explos. Shock Waves*. **51** (5), 578 (2015).
<https://doi.org/10.1134/S0010508215050093>
15. N.A. Kochetov, B. S. Seplyarskii. *Russ. J. Phys. Chem. B*. **16** (1), 66 (2022).
<https://doi.org/10.1134/S1990793122010079>
16. M.A. Korchagin, V.Yu. Filimonov, E.V. Smirnov, N.Z. Lyakhov, *Combust. Explos. Shock Waves*. **46** (1), 41 (2010).
<https://doi.org/10.1007/s10573-010-0007-7>
17. N.A. Kochetov, B.S. Seplyarskii. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 3, 4 (2017) [in Russian].
<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2017-3-4-13>
18. B.V.V'yushkov, E.A. Levashov, A.G. Ermilov et al. *Combust. Explos. Shock Waves*. **30** (5), 630 (1994).
<https://doi.org/10.1007/BF00755828>
19. N.A. Kochetov, S.G. Vadchenko. *Combust. Explos. Shock Waves*. **51** (4), 467 (2015).
<https://doi.org/10.1134/S0010508215040103>
20. N.A. Kochetov. *Combust. Explos. Shock Waves*, **58** (2), 169 (2022).
<https://doi.org/10.1134/S0010508222020058>

21. B. Cantor, I.T.H. Chang, P. Knight, A.J.B. Vincent. *Mater. Sci. and Eng.: A*. **375-377**, 213 (2004).
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
22. Y. Zhang, T.T. Zuo, Z. Tang et al. *Prog. Mater. Sci.* **61**, 1 (2014).
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>
23. M.-H. Tsai, J.-W. Yeh. *Mater. Res. Lett.* **2** (3), 107 (2014).
<https://doi.org/10.1080/21663831.2014.912690>
24. H.-P. Chou, Y.-S. Chang, S.-K. Chen, J.-W. Yeh. *Mater. Sci. Eng.: B*. **163** (3), 184 (2009).
<https://doi.org/10.1016/j.mseb.2009.05.024>
25. A. Gali, E.P. George. *Intermetallics*. **39**, 74 (2013).
<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.03.018>
26. B. Gludovatz, A. Hohenwarter, D. Catoor et al. *Science*. **345** (6201), 1153 (2014).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1126/science.1254581>
27. A. Kilmametov, R. Kulagin, A. Mazilkin et al. *Scr. Mater.* **158**, 29 (2019).
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.08.031>
28. H. Shahmir, J. He, Z. Lu et al. *Mater. Sci. Eng. A*. **685** (8), 342 (2017).
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.01.016>
29. J. Gu, S. Ni, Y. Liu, M. Song. *Mater. Sci. Eng. A*. **755**, 289 (2019).
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.04.025>
30. P.P. Bhattacharjee, G.D. Sathiaraj, M. Zaid et al. *J. Alloys Compd.* **587**, 544 (2014).
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.10.237>
31. J.-W. Yeh, Y.-L. Chen, S.-J. Lin, S.-K. Chen. *Mater. Sci. Forum*. **560**, 1 (2007).
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.560.1>
32. N. A. Kochetov, A. S. Rogachev, A. S. Shchukin et al. *Russ. J. Non-Ferr. Metals*, **60** (3), 268 (2019).
<https://doi.org/10.3103/S106782121903009X>
33. A.S. Rogachev, S.G. Vadchenko, N.A. Kochetov et al. *J. Alloys Compd.* **805**, 1237 (2019).
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.07.195>
34. A.S. Rogachev, S.G. Vadchenko, N.A. Kochetov et al. *J. Europ. Ceram. Soc.* **40**, 2527 (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.11.059>
35. A.S. Rogachev, A.N. Gryadunov, N.A. Kochetov, et al., *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.* **28** (3), 196 (2019).
<https://doi.org/10.3103/S1061386219030117>
36. A. Rajabi, M. J. Ghazali, J. Syarif, A.R. Daud. *Chem. Eng. J.* **255**, 445 (2014).
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.06.078>
37. A. Rajabi, M. J. Ghazali, A. R. Daud. *Mater. Des.* **67**, 95 (2015).
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.081>
38. Y. Peng, H. Miao, Z. Peng. *Int. J. Refract. Met. H. Mater.* **39**, 78 (2013).
<https://doi.org/10.1016/j.jirmhm.2012.07.001>
39. S. Zhang, Y. Sun, B. Ke et al. *Metals*. **8** (1:58), 1 (2018).
<https://doi.org/10.3390/met8010058>
40. Z. Fu, R. Koc. *Mater. Sci. Eng. A*. **702**, 184 (2017).
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.07.008>
41. Z. Fu, R. Koc. *Mater. Sci. Eng. A*. **735**, 302 (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.08.058>
42. A.G. de la Odra, M.A. Avilés, Y. Torres et al. *Int. J. Refract. Met. H. Mater.* **63**, 17 (2017).
<https://doi.org/10.1016/j.jirmhm.2016.04.011>
43. S.G. Vadchenko. *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.* **25** (4), 210 (2016).
<https://doi.org/10.3103/S1061386216040105>
44. S.G. Vadchenko. *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.* **24** (2), 90 (2015).
<https://doi.org/10.3103/S1061386215020107>
45. B.S. Septyarskii. *Dokl. Phys. Chem.* **396** (4–6), 130 (2004).
46. B.S. Septyarskii, R.A. Kochetkov, T.G. Lisina, D.S. Vasiliev. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. **59** (3), 344 (2023).
<https://doi.org/10.1134/S0010508223030097>
47. B.S. Septyarskii, R.A. Kochetkov, T.G. Lisina et al. *Russ. J. Phys. Chem. B*. **17** (5), 1098 (2023).
<https://doi.org/10.1134/S199079312305010X>
48. B.S. Septyarskii, R.A. Kochetkov, T.G. Lisina, N.I. Abzalov. *Russ. J. Phys. Chem. A*. **97** (3), 525 (2023).
<https://doi.org/10.1134/S003602442303024X>
49. B.S. Septyarskii, R.A. Kochetkov, T.G. Lisina et al. *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.* **31**, 195 (2022).
<https://doi.org/10.3103/S1061386222040100>
50. B.S. Septyarskii, N.I. Abzalov, R.A. Kochetkov, T.G. Lisina. *Russ. J. Phys. Chem. B*, **15** (2), 242 (2021).
<https://doi.org/10.1134/S199079312102010X>
51. O.K. Kamynina, A.S. Rogachev, A.E. Sytshev et al. *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.* **13** (3), 193 (2004).
52. O.K. Kamynina, A.S. Rogachev, L.M. Umarov et al. *Combust. Explos. Shock Waves*, **39** (5), 548 (2003).
<https://doi.org/10.1023/A:1026161818701>
53. N.A. Kochetov, B.S. Septyarskii. *Sample Elongation in Combustion // Russ. J. Phys. Chem. B*. **12** (5), 883 (2018).
<https://doi.org/10.1134/S1990793118050172>