

# Особенности получения длинномерных изделий из керамического материала с наноразмерной структурой методом СВС-экструзии

П. М. Бажин, А. М. Столин, М. И. Алымов, А. П. Чижиков

---

Представлены результаты разработки процесса СВС-экструзии для получения длинномерных изделий с наноразмерной структурой из композиционных керамических материалов, содержащих износостойкую составляющую ( $TiC$ ,  $TiB_2$ ) и оксидную эвтектику ( $Al_2O_3 - ZrO_2$ ). Экспериментально исследовано влияние технологических и конструктивных параметров процесса СВС-экструзии на качество получаемых длинномерных стержней и воспроизводимость самого процесса. Исследованы микроструктуры и физико-механические свойства полученных изделий.

**Ключевые слова:** наноструктура, композит, керамический материал, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, СВС-экструзия.

---

## Введение

Высоко оцениваются возможности использования технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) для получения различных нанопорошков. Эта технология имеет значительные возможности для подавления процессов рекристаллизации и агломерации, а также для регулирования размера частиц и структуры синтезированных порошков [1].

Из всего многообразия наиболее важных задач области развития технологии СВС следует выделить проблему, связанную “с прямым получением методом СВС (в одну технологическую стадию) изделий нужной формы, размеров, состава и структуры и в конечном счете, с заданными эксплуатационными свойствами. Первый положительный опыт такого синтеза есть, но конкретные задачи и их решения сильно отличаются друг от друга... Будущее СВС-изделий многообещающее” [1].

Следует отметить, что создание наноматериалов с плотностью, близкой к теоретической — проблема весьма сложная и до сих пор не решенная в порошковой металлургии, поскольку нанокристаллические порошки плохо прессуются и традиционные методы статического прессования не дают положительных результатов. Наночастицы химически активны и при

взаимодействии с другими веществами часто теряют свои уникальные свойства. Агрегирование и агломерирование наночастиц осложняют получение компактных материалов [2].

Перспективным технологическим направлением в СВС представляется получение плотных изделий из композитной керамики с наноразмерными элементами структуры в результате сочетания СВС с высокотемпературным пластическим деформированием синтезированных продуктов горения. Этот механизм реализуется в условиях СВС-экструзии, что вносит ряд совершенно новых особенностей в процесс структурообразования материалов. В ходе экструзии под действием осевых и радиальных напряжений происходит объемное деформирование синтезированного материала, что обеспечивает высокую степень деформации и, как следствие, образование более плотного керамического композита и наноразмерных элементов структуры. Высокие скорости охлаждения экструдированного материала препятствуют росту размеров частиц. В этих условиях появляются дополнительные возможности регулирования режимными параметрами процессов горения исходных компонент экзотермической смеси и высокотемпературного деформирования продуктов горения. Однако для реализации этих возможностей необходимо предъявить определенные

требования как к специальному выбору исходного объекта (плотности шихтовой заготовки и ее исходного состава), так и к выбору условий синтеза продуктов в процессе горения, их уплотнения и формования изделий методом СВС-экструзии.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование влияния технологических и конструктивных параметров процесса СВС-экструзии на качество получаемых длинномерных стержней, содержащих износостойкую составляющую ( $\text{TiC}$ ,  $\text{TiB}_2$ ) и оксидную эвтектику ( $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$ ), воспроизводимость самого процесса, а также исследования микроструктуры и физико-механических свойств, полученных изделий.

### Особенности процесса СВС-экструзии наноструктурного керамического материала

Как технологическая операция СВС-экструзия имеет вполне однозначное и четкое назначение — уплотнить и придать синтезированным продуктам горения определенную форму путем экструдирования их через формующую матрицу [3, 4]. С этой целью предварительно спрессованную заготовку из исходных порошковых реагентов помещают в пресс-форму (рис. 1а), инициируют горение в режиме СВС вольфрамовой спиралью и после заданного времени продавливают материал через формующую матрицу в направляющий калибр (рис. 1б). При этом поперечное сечение экструдированного материала соответствует сечению матрицы.

Характерный температурный диапазон формования материала в процессе СВС-экструзии весьма широк: от температуры горения (1800 – 2000 °С) до

температуры кристаллизации материала [5]. При этом условия проведения процесса необычны: высокие температуры и чрезвычайно большие скорости нагрева (до  $2 \cdot 10^4$  град./с), кратковременность процесса формования изделия (1 – 10 с). Вследствие потерь тепла в окружающую среду образец быстро остывает до температуры окружающей среды, обычно, за время порядка 10 – 100 с (чем больше образец и меньше теплопотери, тем дольше происходит остывание). Все это обуславливает принципиальные различия в механизмах и кинетики структурообразования [6].

В работе [7] методом СВС-экструзии был получен наноструктурный керамический материал, состоящий из износостойкой составляющей ( $\text{TiC} - \text{TiB}_2$ ) и оксидной эвтектики ( $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$ ). В результате различных скоростей кристаллизации этих фаз образованные наноразмерные оксидные зерна окружают более крупные микронные зерна тугоплавких составляющих (карбидные и боридные зерна), которые препятствуют их укрупнению. Конечный размер зерен в структуре зависит от условий технологического процесса: величины приложенного давления, температуры, времени нахождения материала в зоне деформации, а также вида исследуемого материала.

С целью нахождения эффективных способов управления методом СВС-экструзии для получения изделий из керамических материалов с наноразмерной структурой исследовали влияние различных параметров, от которых зависят реальные условия протекания процесса. Можно выделить следующие две основные группы: технологические и конструктивные параметры процесса СВС-экструзии. К числу

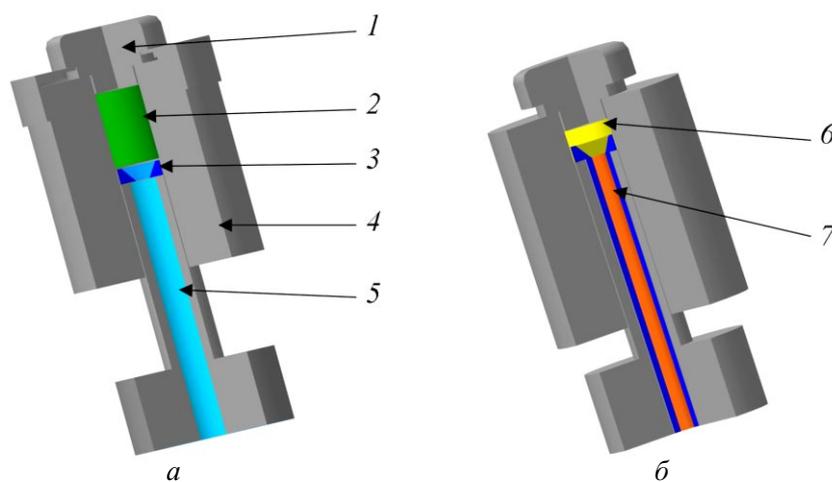


Рис. 1. Схема процесса СВС-экструзии: а — до СВС-экструзии (пресс-форма в сборе): 1 — система поджига, 2 — исходная шихтовая заготовка, 3 — формующая матрица, 4 — пресс-форма в сборе, 5 — направляющий калибр; б — после СВС-экструзии: 6 — материал после СВС (пресс-остаток), 7 — экструдированный материал (готовое изделие).

Таблица 1

Технологические параметры СВС-экструзии

Давление прессования, $p$ , МПа	50 – 150
Скорость плунжера пресса, $V$ , мм/с	10 – 55
Время задержки прессования, $t_3$ , с	2 – 10
Степень деформации, $\psi$	0,89 – 1,0

технологических параметров следует отнести: давление прессования  $P$  на плунжере пресса, скорость  $U_{\text{п}}$  плунжера пресса, время задержки  $t_3$  (табл. 1). Ряд осложнений, возникающих при СВС-экструзии, удастся устранить, меняя конструктивные параметры: геометрические размеры пресс-формы (высота и толщина стенок, внутренний диаметр пуансона), геометрические размеры матрицы (угол конической части матрицы, диаметр выходного отверстия, толщина стенок, длина формирующего пояска).

Существенное влияние на воспроизводимость процесса СВС-экструзии и качество получаемых стержней оказывает длина формирующего пояска ( $L$ ) матрицы. На рис.2 показана зависимость длины экструдированной части керамического материала от длины формирующего пояска для матриц с углом конической части  $\varphi = 120^\circ$ . Начальная масса порошковой заготовки составляла 30 г, скорость перемещения плунжера пресса — 30 мм/с, давление прессования — 100 МПа. Выбор данных значений обусловлен средними величинами, задаваемыми на блоке автоматического управления прессом.

При  $L$  менее 5 мм течение материала через матрицу носит неустойчивый характер, материал практически не формируется и выдавливается в виде прореагировавшего порошка и плохо скомпактированных частей. Увеличение длины формирующего пояска приводит к тому, что время нахождения синтезированного материала в зоне деформации

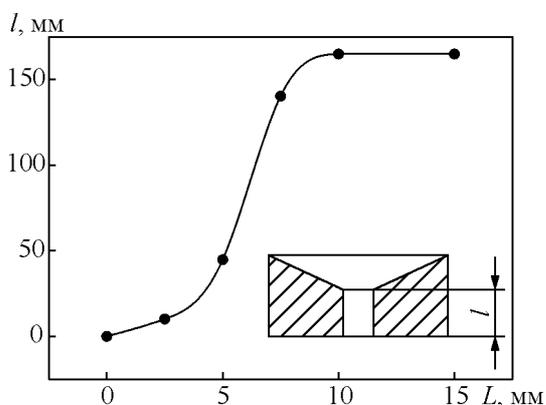


Рис. 2. Зависимость длины экструдированной части материала ( $l$ ) от длины формирующего пояска ( $L$ ).

становится достаточным для устойчивого режима формования и выдавливания, улучшается качество поверхности и прямолинейность стержней, повышается воспроизводимость процесса. При  $L$  больше 10 мм дальнейшее увеличение длины формирующего пояска перестает оказывать заметное влияние на длину экструдированных стержней. Таким образом, оптимальной длиной формирующего пояска для СВС-экструзии керамических материалов является величина 10 мм.

Одним из важнейших технологических режимных параметров является время задержки  $t_3$  — время от начала инициирования химической реакции до начала подачи давления, — параметр определяющий условия на поверхности взаимодействия образца с окружающей средой. На рис. 3 представлена зависимость полноты экструдированной части материала  $K_M$  (отношение массы экструдированной части к массе исходной заготовки) от времени задержки [8].

Для объяснения полученных результатов введем в рассмотрение следующие характерные времена: время реагирования  $\tau_p$ , время формирования структуры материала  $\tau_f$  и время потери материалом пластических свойств — время живучести  $\tau_{ж}$ . Времена  $\tau_p$  и  $\tau_f$  являются, по существу, эффективными параметрами процессов химического реагирования (образование конечного продукта) и структурообразования (формирование компактного материала), а параметр  $\tau_{ж}$  отражает действие реологических факторов. В зависимости от соотношения времени задержки  $t_3$  и характерных времен  $\tau_p$ ,  $\tau_f$ ,  $\tau_{ж}$  реализуются различные предельные случаи для получения образцов электродов методом СВС-экструзии. Таким образом, конкурентное взаимодействие различных процессов обуславливает немонотонный вид этих зависимостей. При малых

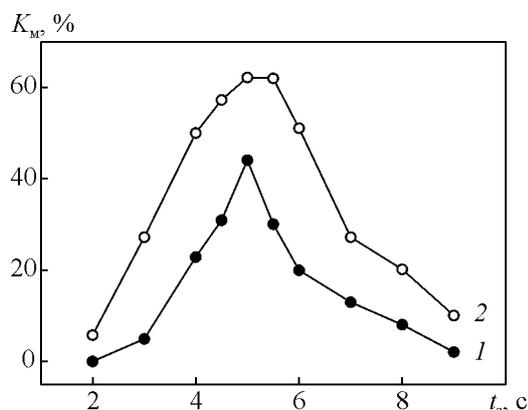


Рис. 3. Зависимость полноты экструдированной части материала ( $K_M$ ) от времени задержки ( $t_3$ ) при температурах, °С: 1 – 20, 2 – 300.

времена задержки (левая ветвь) реакция образования конечного продукта во всем объеме не завершена и материал выдавливается в виде порошка твердой основы. При дальнейшем увеличении времени задержки постепенно уменьшается полнота выдавливания (правая ветвь), поскольку остывание сформированного материала приводит к расширению потерявших способность к деформированию объемных зон образца. При  $t_3 > \tau_{ж}$ , вследствие потери живучести приматричных областей, полностью закупоривается выходное сечение матрицы и прекращается выдавливание.

Исходя из условия наибольшей полноты выдавливания, можно определить оптимальный интервал времени задержки равным 4,5 – 5,5 с. Заметим, что если найденный интервал мал, то попадание времени задержки при СВС-экструзии, найденного эмпирически, будет затруднен. Для практики наработка СВС-электродов наиболее благоприятен случай, когда этот интервал велик. Для его расширения эффективным способом является предварительный нагрев исходной заготовки, который позволяет расширить этот интервал и увеличить полноту выдавливания. Установлено, что при нагреве исходной заготовки до 300 °С, температурный интервал увеличился до 3,5 – 6,5 с, при это полнота экструдированной части выросла до 60%.

Была исследована зависимость качества дефектности поверхности  $K_8$  (соотношение между дефектной и бездефектной частями поперечного сечения образца) от степени поперечной деформации  $\psi$  [8]. Эксперименты показали, что с увеличением степени деформации материала дефектность поверхности сокращается (рис. 4). При этом дефектность поверхности составляет не более 5 – 20% от всего объема экструдированных образцов.

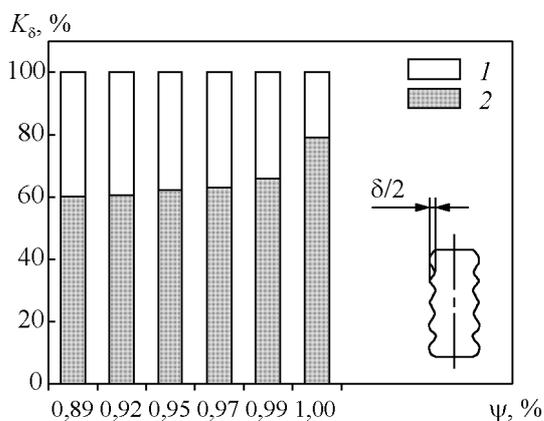


Рис. 4. Зависимость критерия качества поверхности ( $K_8$ ) от степени деформации ( $\psi$ ): 1 – доля дефектной поверхности, 2 – доля качественной поверхности.

Одним из технологических параметров, существенно влияющим на процесс СВС-экструзии, является скорость перемещения плунжера пресса. Установлено, что существует предельное значение скорости, при превышении которого нарушается нормальный режим формования и экструдирования материала. На рис. 5 приведены зависимости длины выдавленной части синтезированного материала от скорости перемещения плунжера пресса при времени задержки  $t_3 = 5$  с. Диаметры выходного сечения матрицы 2, 3 и 5 мм выбраны из соображения наиболее подходящего размера применения в последующем полученных материалов в качестве электродов для электроискрового легирования. Оптимальные интервалы скорости перемещения плунжера пресса для различных диаметров стержней приведены в табл. 2. При повышении оптимальной скорости материал выдавливается в виде отдельных плохо скомпактированных частей или прореагировавшего порошка, то есть при этом материал не успевает сформоваться.

Таблица 2

	Диаметр стержня, мм		
	2	3	5
Скорость плунжера пресса, мм/с	30 – 35	20 – 25	25 – 35

На рис. 6 приведены зависимости длины экструдированных стержней от давления прессования при времени задержки  $t_3 = 5$  с. Как видно из рисунка, процесс СВС-экструзии идет при росте давления. Ограничение давления сверху приводит к прерыванию процесса на разных стадиях. При давлении 120 МПа и выше длина стержней не меняется, что

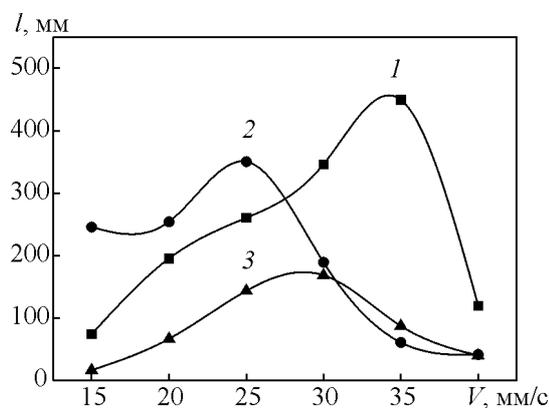


Рис. 5. Зависимость длины экструдированной части материала ( $l$ ) от скорости плунжера пресса ( $V$ ) при диаметре стержня  $d$ , мм: 1 – 2, 2 – 3, 3 – 5.

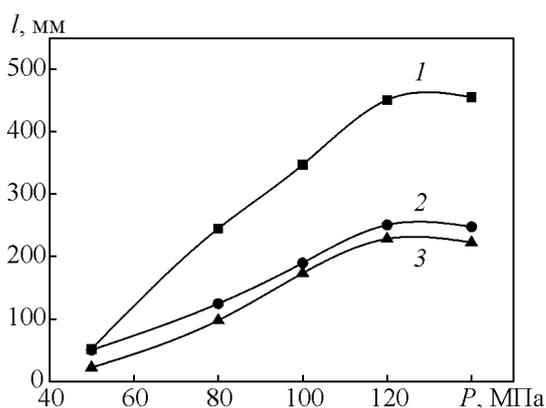


Рис. 6. Зависимость длины экструдированной части материала ( $l$ ) от давления прессования ( $P$ ) при диаметре стержня  $d$ , мм: 1 – 2, 2 – 3, 3 – 5.

объясняется потерей живучести материала в пресс-остатке. Таким образом, оптимальные давления прессования составляют 100 – 120 МПа.

В результате оптимизации процесса СВС-экструзии были получены цилиндрические длинномерные стержни диаметром 2 – 5 мм и длиной до 450 мм из керамических материалов с наноразмерной структурой, содержащих износостойкую составляющую (TiC, TiB<sub>2</sub>) и оксидную эвтектику (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – ZrO<sub>2</sub>). Среди практических приложений этих стержней можно выделить электроды для электроискрового легирования и электродуговой наплавки, микрофрезы, валки, аноды для электролиза алюминия и т.д.

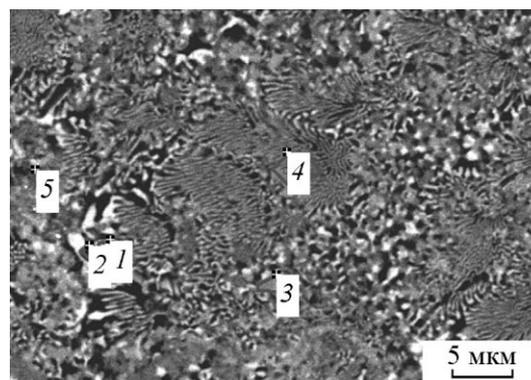
### Микроструктура и свойства полученных материалов

Установлено, что в зависимости от технологических режимов СВС-экструзии с одинаковым составом исходной шихты количество фаз сохраняется, однако их весовое соотношение несколько меняется. В табл. 3 приведен фазовый анализ полученных материалов в зависимости от основных технологических параметров: времени задержки

Таблица 3

Фазовый состав в зависимости от технологических параметров СВС-экструзии

Технологические параметры	Фазовый состав, масс.%					
	TiB <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiC	β-ZrO <sub>2</sub>	α-ZrO <sub>2</sub>	
$t_3$ , с	5	24,7	35,1	22,0	9,2	9,0
( $V = 35$ мм/с)	6	22,9	34,9	21,8	10,1	10,3
$t_3$ , с	5	29,0	26,6	25,2	10,2	9,0
( $V = 25$ мм/с)	6	26,1	34,3	21,5	9,5	8,6
$V$ , мм/с	15	29,9	30,0	22,4	10,2	7,5
( $t_3 = 5$ с)	25	29,0	26,6	25,2	10,2	9,0
	35	24,5	35,4	22,0	9,1	9,1



Спектр	B	C	O	Al	Ti	Zr	Сумма
1		10,02	63,46	10,37	1,93	14,22	100,00
2			65,83	30,74	1,71	1,71	100,00
3		26,89	37,75	10,07	21,71	3,59	100,00
4		9,90	60,49	21,23	2,85	5,53	100,00
5	32,25	43,26	11,49	1,94	10,06	1,00	100,00

Рис. 7. Микроанализ экструдированного материала.

прессования  $t_3$  и скорости перемещения плунжера пресса  $V$  при давлении прессования 100 МПа. Как видно из табл. 3 количество фаз TiB<sub>2</sub>, β-ZrO<sub>2</sub> снижается с увеличением скорости перемещения плунжера пресса, в то время как количество фаз Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и TiC имеет максимум. Таким образом, варьируя технологическими параметрами СВС-экструзии можно заранее предсказать и получить заданную структуру синтезированного материала, что очень важно при получении изделий с заданными свойствами.

Для проведения анализа микроструктуры экструдированные стержни разрезали вдоль и поперек и подготавливали стандартным образом шлифы. Количественный фазовый состав и пористость образцов исследовали точечным методом по фотографиям микроструктур, сделанным в обратно-рассеянных электронах на рентгеновском микроанализаторе УСХА-733. Для каждого измерения использовали сетку с количеством узлов от 850 до 1000. Пористость определяли по стандартной шкале.

На рис. 7 представлена микроструктура экструдированного материала. При помощи энергодисперсионного микроанализатора INCA Energy проведен анализ в точке и по выделенной площади сканированной поверхности образцов. Более светлые фазы идентифицированы как ZrO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (4), серые и темные — TiC и TiB<sub>2</sub> (3, 5). Фазы ZrO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> образуют между собой эвтектику, расположенную колонияльно по всему объему материала и представляющую собой пластинчатую структуру с толщиной пластин менее 20 – 100 нм и длиной 1 – 2 мкм.

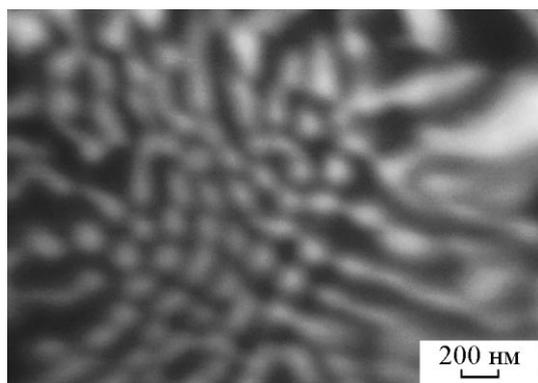


Рис. 8. Эвтектические колонны (поперечное сечение).

Эвтектика окружена тугоплавкими зёрнами TiC и TiB<sub>2</sub> размерами порядка 1 – 2 мкм. Встречающиеся хлопьевидные зёрна оксида циркония (1, 2) находятся на границе раздела между эвтектикой и твердо-сплавными зёрнами.

На рис. 8 представлена микроструктура полученного керамического материала (сечение перпендикулярно приложенной нагрузке). Из рисунка видно, что образуются эвтектические колонны толщиной менее 100 нм вытянутые вдоль приложения нагрузки.

Методом гидростатического взвешивания было определено, что остаточная пористость полученных материалов не превышает 5%. Это можно объяснить тем, что при экструзии происходит деформирование синтезированного материала объемно, в процессе участвуют не только нормальные напряжения как при прессовании, но и радиальные, которые способствуют в большей мере перемещению материала в поры.

Была измерена микротвердость полученных материалов по Виккерсу при нагрузке 100 Н в разных

точках по длине (5 замеров) и сечению (4 замера) образца, которая составляет 1800 – 2100 кг/мм<sup>2</sup>. Важно отметить, что разброс по значениям микротвердости мал (не превышает 10%), что указывает на равномерное распределение структурных составляющих материала по объему. Следует отметить, что полученные композитные керамические наноструктурные материалы имеют значения микротвердости на уровне специальных марок твердых сплавов и режущей керамики (табл. 4).

## Выводы

Изучены и оптимизированы технологические режимы (время задержки, скорость перемещения плунжера пресса, давление прессования) и конструктивные параметры формирующей матрицы (длина пояски) СВС-экструзии для получения керамических материалов с наноразмерной структурой.

Показано, что, варьируя технологическими параметрами СВС-экструзии, можно заранее предсказать и получить заданную структуру синтезированного материала.

Установлено, что полученные композиционные керамические материалы имеют наноразмерную структуру, равномерное распределением фаз по объему образца, низкую пористость (не более 5%) и высокую микротвердость (до 2100 кг/мм<sup>2</sup>).

## Литература

1. Концепция развития самораспространяющегося высокотемпературного синтеза как области научно-технического прогресса. Под ред. А.Г. Мержанова. Черногловка: Территория, 2003, 368 с.
2. Алымов М.И. Порошковая металлургия нанокристаллических материалов. М.: Наука, 2007, 169 с.
3. Столин А.М., Мержанов А.Г. Новые износ- и коррозионностойкие электродные материалы для электроискрового легирования, полученные методом СВС-экструзии. Техника машиностроения, 2003, № 1, с. 15 – 27.
4. Stolin A.M. SHS-extrusion of long components. Intern. Journ. of Self-Propagation High-Temperature Syntesis, 1992, v. 1, no. 1, p. 135 – 140.
5. Столин А.М., Бажин П.М., Хайрулина Р.В. Использование процесса СВС-экструзии для получения композитной нанокерамики. Перспективные материалы, 2012, № 2, с. 77 – 82.
6. Shishkina T.N., Stolin A.M., Podlesov V.V. The influence of SHS production methods used on the material structure formation. Intern. Journ. of Self-Propagation High-Temperature Syntesis, 1995, v. 4, no. 1, p. 35 – 41.
7. Бажин П.М., Столин А.М., Щербаков В.А., Замяткина Е.В. Композитная нанокерамика, полученная методом СВС-

Таблица 4

Микротвердость материалов по Виккерсу при нагрузке 100 Н	
Материал	Микротвердость по Виккерсу, кг/мм <sup>2</sup>
Быстрорежущая сталь (P18, P9, P6M5)	750 – 800
Торговые марки металлокерамических твердых сплавов (BK8, BK6, T15K6)	1200 – 1900
Специальные марки твердых сплавов (ТТ20К9, ТТ7К12)	1600 – 2300 (до 3200)
Режущая керамика (TiB <sub>2</sub> – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiC – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1500 – 2200 (до 2800)
Керамический композит TiC – TiB <sub>2</sub> – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – ZrO <sub>2</sub> (СВС-прессование)	600 – 1100
Керамический композит TiC – TiB <sub>2</sub> – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – ZrO <sub>2</sub> (СВС-экструзия)	1800 – 2100

экструзии. Доклады АН, Химическая технология, 2010, т. 430, № 5, с. 650 – 653.

8. Podlesov V.V., Radugin A.V., Stolin A.M., Merzhanov A.G. Technological basis of SHS extrusion. Intern. Journ. of Self-Propagation High-Temperature Synthesis, 1992, v. 63, no. 5, p. 525 – 537.

## References

1. Merzhanov A.G. Ed. *Koncepciya razvitiya samorasprosnayushegosya visokotemperaturnogo sintesa kak oblasti nauchno-tehnicheskogo progressa* [The concept of self-propagating high-temperature synthesis as a field of scientific and technical progress]. Chernogolovka, Russia, Territoria Publ., 2003, 368 p.
2. Alymov M.I. *Poroshkovaya metallurgiya nanokristallicheskikh materialov* [Powder metallurgy of nanocrystalline materials]. Moscow, Nauka Publ., 2007, 169 p.
3. Stolin A.M., Merzhanov A.G. Novii iznoso- i korrozionostoikie elektrodnie materialy dlya electroiskrovogo legirovaniya, polucheniya metodom SVS-extruzii [New wear- and corrosion-resistant electrode materials for electric-spark alloying produced by SHS-extrusion]. *Technica*

*mashinostroeniya — Machinery engineering*, 2003, no. 1, pp. 15 – 27.

4. Stolin A.M. SHS-extrusion of long components. Int. journal of self-propagation high-temperature synthesis. 1992, vol. 1, no. 1, pp.135 – 140.
5. Bazhin P.M., Stolin A.M., Khairullina R.V. Ispolzovanie processa SVS-extruzii dlya polucheniya nanocompozitnoi ceramiki [SHS extrusion for production of nano-composite-ceramics]. *Perspektivnye materialy — Advanced materials*, 2012, no. 2, pp. 77 – 82.
6. Shishkina T.N., Stolin A.M., Podlesov V.V. The influence of SHS production methods used on the material structure formation. Int. Journ. of self-propagation high-temperature synthesis, 1995, vol. 4, no. 1, pp. 35 – 41.
7. Bazhin P.M., Stolin A.M., Shcherbakov V.A., Zamyatkina E.V. Nanocomposite ceramic produced by SHS extrusion. *Doklady Akademii nauk. Khimiya — Doklady chemistry*, 2010, vol. 430, no. 2, pp. 58 – 61.
8. Podlesov V.V., Radugin A.V., Stolin A.M., Merzhanov A.G. Technological basis of SHS extrusion. Int. Journ. of self-propagation high-temperature synthesis. 1992, vol. 63, no. 5, pp. 525 – 537.

*Статья поступила в редакцию 23.07.2014 г.*

**Бажин Павел Михайлович** — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук (ИСМАН) (г. Черноголовка), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, специалист в области высокоэффективных процессов обработки материалов. E-mail: olimp@ism.ac.ru.

**Столин Александр Моисеевич** — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук (ИСМАН) (г. Черноголовка), доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, специалист в области высокотемпературного деформирования, структурной макрокинетики и реологии полимерных и неорганических материалов. E-mail: amstolin@ism.ac.ru.

**Алымов Михаил Иванович** — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук (ИСМАН) (г. Черноголовка), член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, директор, специалист в области порошковой металлургии нанокристаллических материалов. E-mail: director@ism.ac.ru.

**Чижигов Андрей Павлович** — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук (ИСМАН) (г. Черноголовка), аспирант, специализируется в области физико-химии процессов и материалов. E-mail: chiz\_an@mail.ru.

## **Peculiarities of long products of ceramic material with a nanoscale structure by SHS-extrusion**

**P. M. Bazhin, A. M. Stolin, M. I. Alymov, A. P. Chizhikov**

The experimental results of the development of SHS-extrusion process to produce long products with nanoscale structure of composite ceramic materials containing wear resistant component (TiC, TiB<sub>2</sub>) and eutectic oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – ZrO<sub>2</sub>). The experimental results of the effect technological and constructive parameters of the process of SHS-extrusion on the quality of the long-length rods and reproducibility of the process itself. The results of studies of the microstructure and physical-mechanical properties of the products obtained.

**Keywords:** nanostructure, composite, ceramic material, self-propagating high-temperature synthesis, SHS-extrusion.

---

**Bazhin Pavel** — Institute of structural macrokinetics and materials science RAS, PhD, senior researcher. E-mail: [olimp@ism.ac.ru](mailto:olimp@ism.ac.ru).

**Stolin Alexander** — Institute of structural macrokinetics and materials science RAS, professor, head of laboratory. E-mail: [amstolin@ism.ac.ru](mailto:amstolin@ism.ac.ru).

**Alymov Mihail** — Institute of structural macrokinetics and materials science RAS, professor, corresponding member of RAS, director. E-mail: [director@ism.ac.ru](mailto:director@ism.ac.ru).

**Chizhikov Andrei** — Institute of structural macrokinetics and materials science RAS, graduate student. E-mail: [chiz\\_an@mail.ru](mailto:chiz_an@mail.ru).