

Структурные особенности пористых материалов, сформированных волной самораспространяющегося высокотемпературного синтеза

**А. С. Мазной, А. И. Кирдяшкин, В. Д. Китлер,
Ю. М. Максимов, Р. А. Юсупов**

На основе комплексных экспериментальных исследований, включающих высокоскоростную микровидеоосъемку и динамическую пирометрию процессов, физико-химический анализ продуктов и количественное описание пористых структур методами стереометрической металлографии показаны особенности поровой структуры пористых проницаемых материалов, сформированных волной самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

Ключевые слова: структура, пористость, синтез, СВС, стереометрическая металлография, анизотропия.

Revealing the structure is important for predicting properties of any materials. The features of porosity structure of materials, formed by the wave of self-propagating high temperature synthesis, were experimentally studied. The investigations were performed using special experimental techniques involving high-speed video filming, dynamic pyrometry processes, physicochemical analysis of products and quantitative description of porous structures by stereometric metallography.

Key words: structure, porosity, synthesis, SHS, stereometric metallography, anisotropy.

Введение

В сравнении с традиционными керамическими технологиями, получение функциональных пористых материалов в процессе СВС привлекательно как в связи с энерго- и ресурсосберегающими эффектами, так и благодаря возможностям достижения новых характеристик фазового состава, структуры и свойств материалов [1]. Специфика СВС обусловлена автоволновыми режимами процесса, где сочетаются высокая температура (до 3500 К), большой температурный градиент (до 10^7 К/мм), малые времена ($10^{-1} - 10^{-3}$ с) химического и структурного превращений веществ. Как показывают исследования, пористая металлокерамика СВС на основе интерметаллидных, металлоксидных композиций и безкислородных соединений эффективна в составе фильтров, блочных катализаторов, огнеупоров [2].

При решении ряда практических задач большое внимание уделяется вопросам создания пористых проницаемых материалов (ППМ) с высоким уровнем

механических и гидравлических свойств. Известны ППМ, получаемые печным спеканием засыпок агрегатированных порошков или порошковых смесей с выгорающими порообразователями [3]. Данные материалы обладают сложной структурой пористости: мезоструктурой, образованной пористыми агрегатами и межагрегатными порами (макропористость материала) и субмезоструктурой, которая образована частицами порошка и межчастичными замкнутыми порами (микропористость материала) [4]. Существенное влияние параметров мезо- и субмезоуровней пористости на эксплуатационные свойства ППМ показано в [5 – 8].

ППМ СВС достаточной прочности (предел прочности на сжатие $\delta_{сж} > 10 - 15$ МПа) удаётся изготавливать при условии частичного плавления исходных компонентов и продуктов реакции в волне горения. В этом случае достигается максимальная интенсивность реакционного спекания целевого материала. Для устранения макроскопических трещин, вызванных давлением летучих примесей,

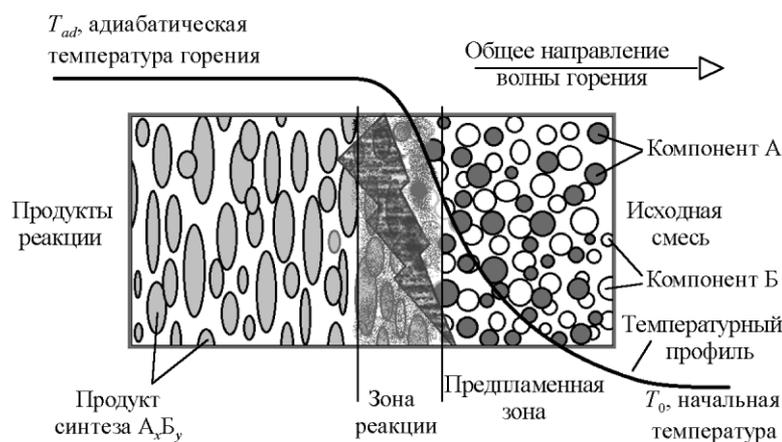


Рис. 1. Пространственное распределение температуры в волне СВС.

газифицирующихся в волне, требуется ограничение линейной скорости горения в пределах 10–20 мм/с. Указанные условия реализуются при протекании СВС в различных нестационарных режимах, которые оказывают специфическое влияние на поровую структуру ППМ СВС.

Проблема прогнозирования функциональных свойств ППМ СВС (прочность, газо-жидкостаная проницаемость, каталитическая активность и др.) определяет необходимость точного знания параметров мезо- и субмезоструктуры продуктов синтеза. Цель работы — изучение наиболее общих особенностей поровой структуры продуктов СВС и их взаимосвязей с режимами синтеза.

Методы экспериментальных исследований

СВС представляет собой автотермический процесс химического превращения гетерогенной системы в конденсированные продукты реакции, протекающий в виде волны горения. Процесс инициируется тепловым импульсом от внешнего источника (спирали накаливания, поджигающего состава). Подведённая энергия прогревает узкий слой смеси исходных реагентов и активирует экзотермическую реакцию. Выделяемое реакцией тепло передаётся в следующий слой, возбуждая дальнейшее протекание реакции и так далее. Характерны две зоны адиабатической волны горения (рис. 1) — предпламенная зона, где протекают процессы тепло- и массопередачи и реакционная зона, в которой происходит интенсивное химическое тепловыделение и образование структуры материала [9].

Исследование формирования пористых материалов в процесс СВС проводили на примере порошковых реакционных систем: Ni–Al; Ni–Al–ГД

(ГД — газифицирующаяся добавка: CaCO_3); Ti–B–Cu; Fe–TiO₃–Al–Si–C с использованием в качестве компонентов порошков: Ni марки ПНК1-Л5, Al — АСД-4, Ti — ПТЭМ, В — бор аморфный чёрный (99,0% основного вещества), Cu — ПМ-1, Si — КР1, С — ГЛ4, FeTiO₃ — природный ильменитовый концентрат Туганского месторождения.

Приготовленные порошковые системы формовали в цилиндрические образцы диаметром 20 мм и относительной плотностью Δ вдоль оси которых инициировалась волна СВС. Для обеспечения минимального количества газовыделений легколетучих примесей в процессе СВС (менее 0,05–0,1 мг на 1 г исходной смеси) исходные реакционные смеси подвергали предварительной термообработке в вакууме (ТВО) (давление воздуха 0,1 Па) при температурах от 500 до 900 К. Температурное поле волны СВС анализировали с применением метода динамической пирометрии [10] на основе обработки данных видеозаписи процесса на высокоскоростную видеокамеру MotionProX3. Для визуализации структурообразования в волне горения использовали подсветку поверхности образца излучением лазера по методике, представленной в [11]. Фазовый состав материалов определяли с помощью рентгенофазового анализа.

Продукты СВС исследовали металлографическим методом на микроскопе “CarlZeiss Axiovert 200 M-Mat” с помощью автоматического анализатора изображений “ImageScope ColorM”, а также специализированных методик [12], позволяющих проводить количественную оценку параметров порового пространства материалов со сложными структурами пористости. При анализе учитывали геометрические характеристики сечений пор и элементов скелета. К подгруппе замкнутых пор относили те поры, сечения которых не содержат элементов скелета. Остальные

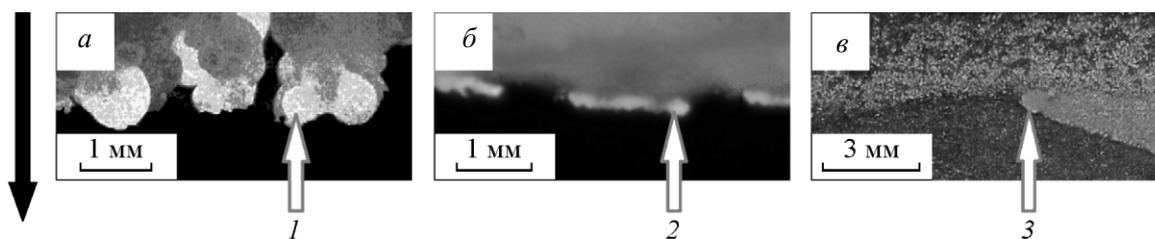


Рис. 2. Кадры скоростной видеосъёмки нестационарных режимов СВС: *a* — сцинтилляционный, *б* — многоочаговый, *в* — спиновый. 1 — сцинтилляционный очаг, 2, 3 — хаотичная и спиновая миниволна. Тёмной стрелкой указано общее направление горения.

поры считали открытыми, образующими сеть разветвленных связанных транспортных каналов в материале. Определяли следующие параметры мезо- и субмезоструктуры: размер поровых каналов (D_{Can}), удельную поверхность открытой пористости (S_{Surf}), размер элементов скелета (D_{El}), количество замкнутых пор в единице объёма скелета (N), долю закрытой пористости в общей пористости материала ω . Распределение замкнутых пор по размерам получали по модернизированной методике Салтыкова [13]. Анизотропию материала оценивали по гистограмме ориентации α -углов наклона прямых, проходящих через максимальный диаметр Фере структурных элементов (линии F). Угол рассчитывали относительно плоскости, ориентированной нормально общему направлению горения. Также определяли фактор удлинения структурных элементов f_L — отношение величины диаметра Фере, измеренного в перпендикулярном направлении к линии F , к величине максимального диаметра Фере. Анализ морфологии проводили на достаточно большой площади участка образца, где определяемые количественные характеристики не зависят от геометрии и размера участка.

Обсуждение результатов

При СВС пористой металлокерамики типичны режимы сцинтилляционного, многоочагового и упорядоченного спинового горения [14 – 17]. При сцинтилляционном режиме волна горения состоит из сверхадиабатических неподвижных реакционных очагов, хаотично возникающих в макроскопическом фронте горения (рис. 2*a*). При многоочаговом режиме в волне горения хаотически возникают миниволны, которые распространяются перпендикулярно общему направлению горения (рис. 2*б*). При упорядоченном спиновом режиме распространение миниволн (в пределах одной миниволны) происходит преимущественно в одном направлении вдоль винтовой поверхности вокруг общего направления горения (рис. 2*в*).

Тепловой режим горения оказывает специфическое влияние на поровую структуру синтезируемых материалов. На рис. 3 представлены типичные структуры пористости, полученные в различных нестационарных режимах (табл. 1). При сцинтилляционном режиме СВС продукт характеризуется капельными структурами с крупными элементами скелета (рис. 3*a*) — подобные структуры наблюдали в системах Ni – Al – ГД, Co – Al – ГД, Ti – Si – ГД. При многоочаговом режиме горения структура СВС-продукта содержит щелевидные дисковые поры (рис. 3*б*) — это характерно для систем FeTiO₃ – Al – Al₂O₃, FeO – Al – Al₂O₃, NiO – Al – Al₂O₃. Продукты синтеза, полученные в спиновом режиме СВС, характеризуются периодической (слоистой) структурой пористости (рис. 3*в*) — системы Ti – В – Cu, Ni – Al, Ni – Al – Cr.

Согласно данным пирометрии, температура изучаемых реакционных систем внутри сцинтилляционных очагов, хаотичных и спиновых миниволн кратковременно (10 – 20 мс) на 100 – 300 К превышает температуру близлежащих участков волны горения. Последнее объясняется эффектом локального выделения избытка энтальпии реакционных систем, обусловленным тепло-диффузионной и гидродинамической неустойчивостью волновых экзотермических реакций в конденсированных средах [11, 18]. Данные динамического мониторинга поверхности образца в процессе СВС, полученные с помощью скоростной микровидеосъёмки, показали, что в волне горения первичные продукты возникают в виде микрокапель размером 50 – 200 мкм. Поскольку наблюдаемая температура в волне горения T_C превышает точку плавления исходных компонентов (Al, Si, Ni и др.), формирование микрокапель объясняется процессом коалесценции частиц смеси под действием поверхностных сил расплава. В процессе коалесценции капель происходят химические превращения расплавов исходных реагентов в продукт синтеза (NiAl, TiB₂, Al₂O₃ и др.). Температура в волне ниже точки плавления продуктов, поэтому происходит увеличение вязкости материала

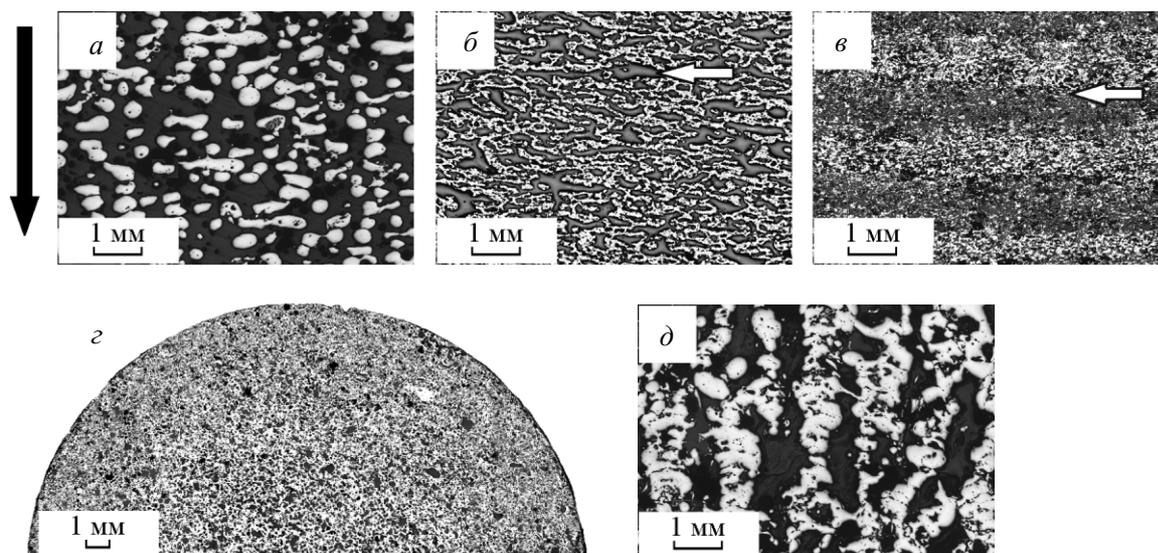


Рис. 3. Продольные (*a – в, д*) и поперечное (*з*) сечения пористых продуктов синтеза, полученных в нестационарных режимах СВС. *a – д* – материалы 1 – 5, соответственно (табл. 1). Тёмной стрелкой указано общее направление горения. Светлыми стрелками указано место прохождения хаотичной (*б*) и спиновой (*в*) миниволн.

Таблица 1

Анализ ППМ СВС

№ образца	Исходный состав шихты	ТВО шихты	Режим горения	Относительная плотность образцов Δ	Состав ППМ СВС	Рис. 3
1	(Ni + 18% Al) + 2% ГД	Нет	сцинтилляционный	0,45	NiAl, Ni ₃ Al	<i>a</i>
2	(FeTiO ₃ + 30% Al) + 30% Si + 25% SiO ₂ + 4% C	Нет	многоочаговый	0,51	Al ₂ O ₃ , сплав Ti-Fe-Si-C	<i>б</i>
3	(Ti+31,1%B)+70%Cu	Да	спиновый	0,45	TiB ₂ , Cu	<i>в</i>
4	Ni + 20%Al	Да	многоочаговый	0,53	NiAl, Ni ₃ Al	<i>з</i>
5	(Ni + 25%Al)+2%ГД	Нет	сцинтилляционный	0,44	NiAl, Ni ₃ Al	<i>д</i>

за счёт повышения объёмной доли твёрдых частиц. Следовательно, время роста капель за счёт коалесценции ограничено временем реакции. В соответствии с теорией горения, характерное время роста капель t_k можно описать следующим соотношением:

$$t_k \approx t_w \approx \frac{a}{U_C^2},$$

где t_w — характерное время реакции, a — теплопроводность системы в волне горения, U_C — скорость фронта волны СВС. Слившиеся микрокапли образуют пористый каркас конечного продукта СВС.

Установлено, что при низкой относительной плотности исходного образца ($\Delta = 0,4 - 0,45$) скелет ППМ представляет собой систему спящих капель, окружённых сетью открытых пор (каркасная структура пористости). Замкнутые поры локализуются внутри элементов скелета. В случае $\Delta > 0,5$ мезоструктура материала приближается к структуре пены (матричная структура пористости), где открытые

поры образованы нарушениями сплошности перегородок замкнутых пор материального скелета.

Согласно данным металлографического анализа, для продуктов СВС характерно изменение поровой структуры в направлении от центра к периферии образца (рис. 4*a*). В центре наблюдаются максимальные значения D_{Can} , D_{El} , ω , а вклад в закрытую пористость пор максимального размера на порядок больше, чем для периферийных слоёв материала (рис. 5, кривые 4.1, 4.2). Наблюдаемая градиентность объясняется влиянием теплотеря в процессе СВС через внешнюю поверхность образца. В результате в центре образца температура волны горения выше, чем на периферии. Различия температуры достигают 50 – 100 К и более. Таким образом, для получения наружных слоёв материала с поровой структурой отличной от структуры исходной порошковой засыпки необходимо минимизировать теплотеря при СВС, что можно реализовать использованием теплоизоляционных засыпок.

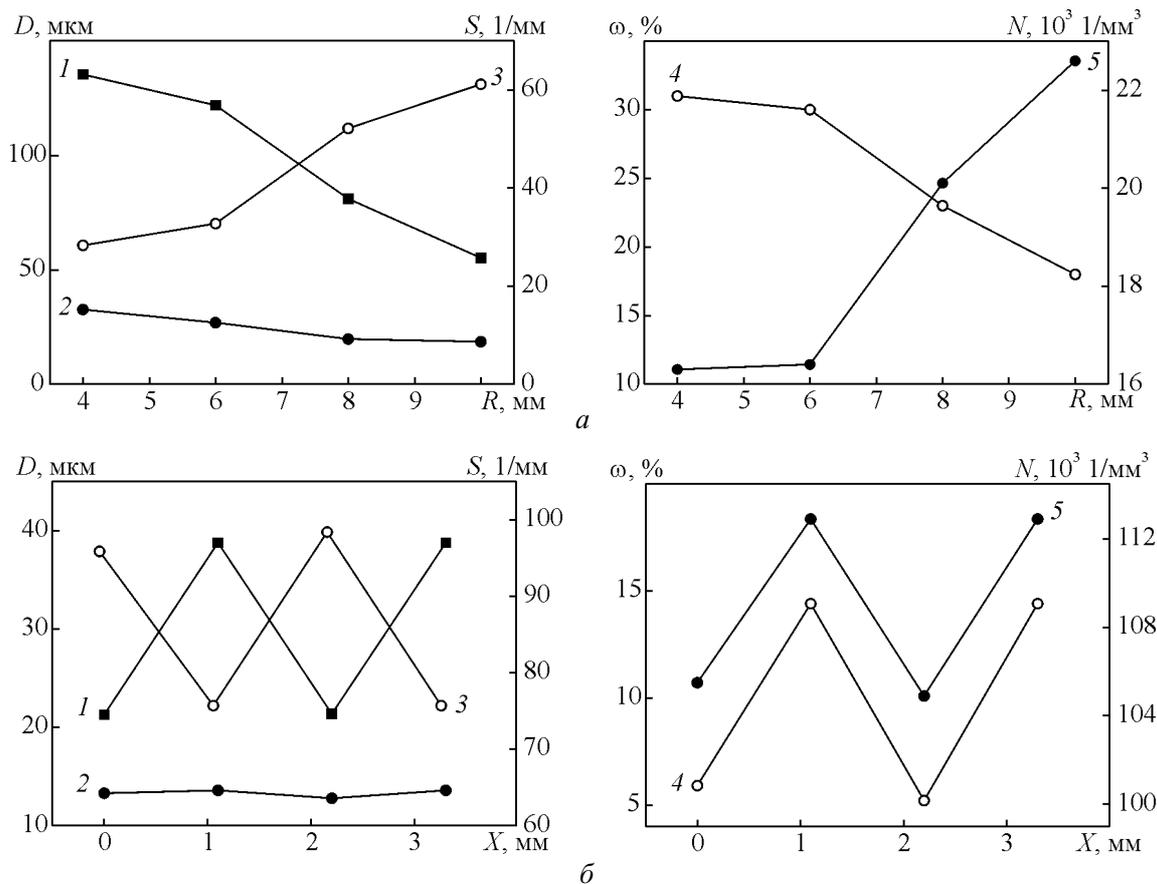


Рис. 4. Распределение характеристик поровой структуры: а – образца 4 в зависимости от расстояния от центра образца R , б – образца 3 вдоль оси цилиндрического образца X : 1 – D_{Eb} , 2 – D_{Can} , 3 – S_{Surf} ; б: 4 – ω , 5 – N .

Полученные в режиме спигового горения продукты СВС характеризуются периодической структурой в виде чередующихся слоев, имеющих различную поровую структуру. Согласно [11], периодическая структура является результатом капиллярного перераспределения расплава легкоплавких компонентов системы в зоне волны горения, а также термического воздействия спигового очага. Наименьшие величины D_{Can} , D_{Eb} , ω , N характерны для зон прохождения спигового очага (мелкопористый слой), а для крупнопористого слоя, сформированного низкотемпературной зоной спиговой миниволны, характерно увеличение указанных величин (рис. 4б). Субмезоструктура материала характеризуется появлением в крупнопористом слое замкнутых пор размером более 40 мкм (рис. 5, кривые 3.1, 3.2). На данный момент материалы со слоистой структурой не имеют практического применения, однако представляют интерес для организации каталитических процессов, когда необходимо обеспечивать особые режимы теплообмена и катализа. Крупнопористый

слой обеспечит транспорт газовых реагентов и отвод тепла из зоны реакции, а мелкопористый слой, обладающий большей поверхностью, необходим для обеспечения каталитического процесса.

Доля закрытой пористости ППМ СВС существенно зависит от начальной плотности образца и находится в интервале $\omega = 5 - 30\%$. Нижняя граница интервала соответствует $\Delta = 0,40 - 0,45$, верхняя — $\Delta = 0,50 - 0,60$. При СВС с минимальным количеством примесных газовывделений максимальное количество замкнутых пор имеет размер 2 – 20 мкм (рис. 5а, кривые 3, 4). По порядку величины этот размер близок к размеру частиц исходных компонентов. Меньшая часть пор, представляющая основной объем закрытой пористости, обладает размером порядка 50 – 100 мкм (рис. 5б). Можно предположить, что первичные замкнутые поры формируются в волне горения в процессе коалесценции на базе газовых промежутков между частицами смеси; в дальнейшем, часть первичных пор расширяется внутренним давлением газов. Так при существенном

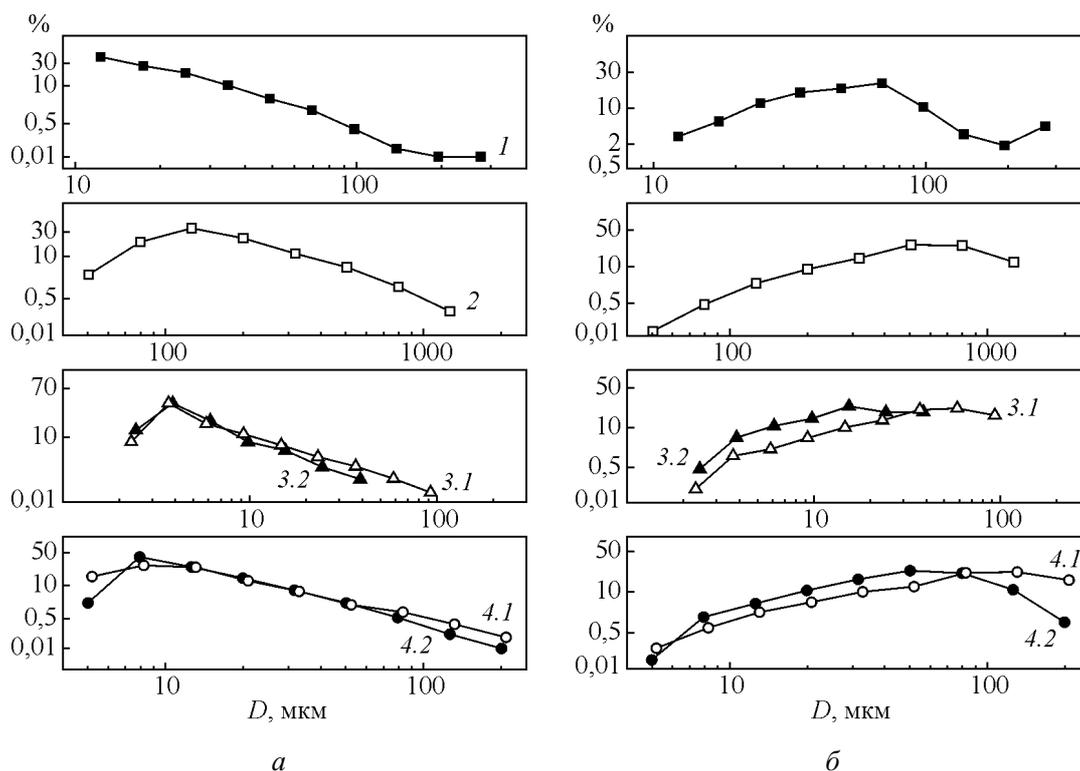


Рис. 5. Распределение замкнутых пор по размерам (а) и по вкладам в пористость скелета (б). Кривые 1 – 4 – образцы 1 – 4, соответственно (3.1, 3.2 – крупнопористый и мелкопористый слой образца, соответственно, 4.1 и 4.2 – центральная и периферийная часть поперечного разреза ППМ, соответственно).

газовыделении СВС (более 0,1 – 0,2 мг на 1 г исходной смеси — образцы 1, 2, 5) наблюдается укрупнение замкнутых пор (рис. 5, кривые 1, 2).

Размер открытых пор продуктов синтеза находится в интервале $D_{Can} \approx 10 - 1000$ мкм и значительно зависит от режима синтеза. Открытые поры в виде вытянутых миниполостей (образцы 2, 4) образуются в местах распространения хаотичных миниволн, где происходит локальное плавление, усадка и капиллярное перераспределение расплава материала. Наибольшие значения D_{Can} и D_{El} реализуются при сцинтилляционном режиме горения низкоплотных смесей (образцы 1, 5). Более крупные поровые каналы обеспечивают повышенную газовую проницаемость материала, а крупные элементы скелета обеспечивают материал высокой механической прочностью и теплопроводностью. Таким образом, организация сцинтилляционного режима синтеза важна для получения материалов, применяемых в качестве горелок и носителей катализаторов, где требуется макропористая структура.

Структура материалов СВС обладает анизотропией. Значительное количество структурных элементов имеет вытянутую форму с фактором

удлинения $f_L = 0,4 - 0,8$ и ориентацию практически по нормали к общему направлению горения (рис. 6). Анизотропия структур может быть обусловлена преимущественным спеканием (коалесценцией) частиц вдоль слоя реакционной зоны волны горения, где система имеет минимальную вязкость. В системах с существенным газовыделением (образцы 1, 2, 5) параметры анизотропии замкнутых пор и элементов скелета значительно отличаются (рис. 6а, кривые 1, 2). Большинство замкнутых пор характеризуются значением $f_L = 0,8 - 1$, а элементы скелета имеют $f_L = 0,4 - 0,8$; наблюдаются несовпадения ориентации структурных элементов (рис. 6б, кривые 2).

В некоторых случаях происходит формирование столбчатой структуры ($\alpha = 90^\circ$) скелета и замкнутых пор (рис. 6б, кривые 1, 3), что, вероятно, вызвано перегруппировкой капельных образований вещества вдоль направления горения под действием микропотоков газа и расплавов. Образование столбчатой структуры при сцинтилляционном режиме СВС возможно при увеличении объёма жидкой фазы в волне горения. Так при увеличении массовой доли алюминия до 25% (образец 5) поровая структура синтезированного материала характеризуется зна-

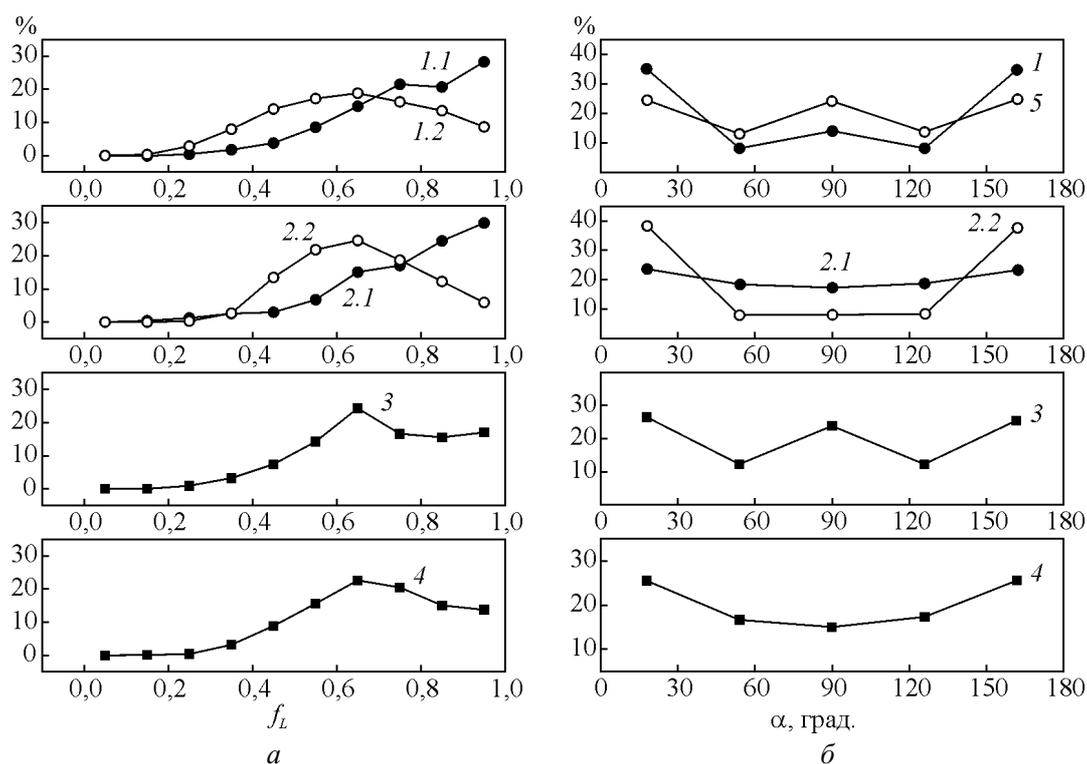


Рис. 6. Гистограммы факторов удлинений f_L (а) и ориентации α (б) замкнутых пор и элементов скелета. Кривые 1 – 5 – образцы 1 – 5 (1.1, 2.1 и 1.2, 2.2 – значения для замкнутых пор и элементов скелета, соответственно).

чительным увеличением доли столбчатых структур, ориентированных вдоль общего направления горения (рис. 6б, кривая 5).

Анизотропия структур пористости обуславливает анизотропию функциональных свойств материала. Образец 2 обладает прочностью на сжатие и газопроницаемостью в направлении вдоль ориентации пор примерно в 1,3 – 1,5 раза большими, чем в перпендикулярном направлении. Перспективной областью применения материалов с анизотропной структурой является использование в системах фильтрации жидкости и газов, где фильтрация потока организована в направлении ориентации пор.

На основе проведенных исследований разработана СВС-технология изготовления пористых металлокерамических труб длиной до 1500 мм, диаметром до 350 мм, пластин и деталей сложных форм с габаритами до 400 мм, состав которых — различные метало-оксидные и интерметаллидные композиции [19, 20]. Общие характеристики изделий следующие: открытая пористость — 50 – 65%; размер транспортных каналов — 15 – 300 мкм; прочность на сжатие — 25 – 40 МПа; термостабильность — 1000 – 1500 К.

Так, металлокерамика $Al_2O_3 - Ti - Fe - Si - C$ (рис. 3б), изготовленная с использованием мине-

ральных концентратов ильменита и кварца, показывает высокую эффективность в системах фильтрационной очистки воды от железа и взвесей, а также технических масел от механических примесей и воды. Анизотропная структура порового пространства (дисковые поры) обеспечивает высокую гидродинамическую проницаемость материала в поперечном направлении образца с сохранением заданной тонкости очистки флюида от примесей. В производстве ОАО “Саянскимпласт” (г. Саянск Иркутской области) фильтрующие СВС-трубы используют для очистки острого водяного пара (420 К) и деминерализованной воды от дисперсных примесей.

Пористые материалы с каркасной структурой эффективны для обеспечения максимальной газопроницаемости. На базе труб и пластин из пористой СВС-металлокерамики (рис. 3а) создана серия опытных пористых горелок мощностью от 5 до 2500 кВт для энергетической конверсии природного газа. Данные горелки обеспечивают лучистую энергоотдачу до 40% от общей тепловой мощности и имеют очень низкий уровень выбросов NO (26 – 33 mg/m^3), что соответствует лучшим европейским стандартам низкоэмиссионных горелок (“Голубой ангел”, $NO < 47 mg/m^3$). Пористые СВС-изделия из никельсо-

держащих метало-оксидных композиций показывают хорошую эффективность в качестве каталитических конвертеров в процессах химической переработки природного газа в синтез-газ. На базе специального каталитического СВС-конвертера трубчатой формы разработан пилотный генератор синтез-газа производительностью 50 м³/ч. Отличительными особенностями нового генератора синтез-газа является отсутствие внешних затрат энергии, а также повышенная компактность. Учитывая известную характеристику компактности как отношение производительности к объему химического реактора, для нового реактора это число достигает $3 \cdot 10^3 \text{ ч}^{-1}$ и многократно превышает уровень традиционных систем на основе зернистых катализаторов [2].

Принципиальное отличие характеристик структуры ППМ, полученных печным спеканием и методом СВС: если в первом случае поровая структура материала наследует, в основном, характеристики исходной гетерогенной системы, то во втором — взаимосвязь указанных параметров достаточно слабая. При протекании СВС формирование структуры порового пространства происходит при существенном влиянии волновых процессов химических и структурных превращений. Формирование структур пористости происходит с участием процессов капиллярной коалесценции частиц исходных компонентов в волне горения. Возможности направленного регулирования структуры ППМ СВС во многом определяются знанием тонких механизмов структурной динамики реакции, требующих дополнительных исследований.

Выводы

Установлено, что продукты СВС, синтезированные в гетерогенных порошковых средах при ограничении U_C в диапазоне 10 – 20 мм/с и T_C в волне в диапазоне между точками плавления наиболее легкоплавкого исходного компонента и наиболее тугоплавкого продукта реакции, обладают следующими особенностями мезо- и субмезоструктуры:

1. Структура порового пространства градиентно меняется от центра к периферии образца. Центральные области характеризуются большими величинами D_{El} , D_{Can} , ω в сравнении с периферийными слоями продуктов. Эффект объясняется тем, что в центре образца максимальная температура горения выше, чем на периферии, что связано с теплопотерями реакционной системы в процессе реакции.

2. Параметры мезоструктуры существенно зависят от режима СВС. Максимальное удлинение открытых пор реализуется при многоочаговом

режиме горения. Наибольший размер элементов скелета и открытых пор возникает в режиме сцинтилляционного горения низкоплотных реакционных смесей. Для спиновоего режима характерно образование слоевой периодической структуры порового пространства продуктов горения — спиновый очаг формирует мелкопористый слой, с меньшими величинами D_{Can} , D_{El} , ω в сравнении с параметрами крупнопористого слоя, сформированного низкотемпературной зоной спиновой миниволны.

3. Субмезоструктура СВС-продуктов зависит от газообразования в волне горения. При минимальном уровне газовыделений (менее 0,05 – 0,10 мг на 1 г исходной смеси) основное количество замкнутых пор по размеру соответствует частицам исходных компонентов реакции (2 – 20 мкм); наблюдается подобие параметров анизотропии мезо- и субмезоуровней пористости ППМ. С увеличением количества газовыделений средний размер замкнутых пор возрастает до 100 мкм и более, при этом параметры анизотропии пор и элементов скелета для мезо- и субмезоуровня отличаются.

4. Элементы пористого скелета, замкнутые и открытые поры имеют вытянутую форму (фактор удлинения $f_L = 0,4 – 0,8$ и менее), ориентированную по нормали и/или параллельно основному направлению горения. Первое связано с наименьшей вязкостью системы во фронте волны горения. Второе, вероятно, вызвано перегруппировкой микрокапель расплавленного вещества вдоль общего направления горения под действием микропотоков газа и расплавов.

Авторы выражают благодарность А.Н. Гуцину и В.Г. Саламатову за помощь в проведении экспериментальных работ, ценные обсуждения и замечания.

Литература

1. Мержанов А.Г. Процессы горения и синтез материалов. Под ред. В.Т. Телепы, А.В. Хачояна. Черноголовка: ИСМАН, 1998, 512 с.
2. Кирдяшкин А.И., Максимов Ю.М. Функциональная пористая металлокерамика СВС: Разработка и применение. Фундаментальные и прикладные проблемы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза: Материалы научного семинара (29 – 30 сентября 2009 г., г. Томск). Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2009, с. 55 – 61.
3. Бойцов О.Ф., Чернышев Л.И., Солонин С.М. Влияние структуры порового пространства на механические свойства высокопористых материалов, полученных с использованием порообразователя. Порошковая металлургия, 2006, № 9/10, с. 8 – 14.
4. Nikolenko A.N. Mesoscopics of the concept of a hierarchical structure of material. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 1998, v. 37, no. 1 – 2, p. 72 – 78.

5. Скороход В.В. Теория физических свойств пористых и композиционных материалов и принципы управления их микроструктурой в технологических процессах. Порошковая металлургия, 1995, № 1/2, с. 53 – 71.
6. Гетьман О.И., Чернышёв Л.И. Анализ особенностей пористой структуры никелевых проницаемых материалов с бимодальным распределением пор. Порошковая металлургия, 2003, № 11/20, с. 102 – 110.
7. Солонин С.М., Чернышёв Л.И. Мезоструктурная обусловленность свойств пористых материалов. 1. Особенности анализа поровой структуры пористых материалов. Порошковая металлургия, 2008, № 9/10, с. 76 – 88.
8. Солонин С.М., Чернышёв Л.И. Мезоструктурная обусловленность свойств пористых материалов. 2. Обобщенные характеристики порового пространства пористых материалов. Порошковая металлургия, 2008, № 11/12, с. 71 – 79.
9. Зельдович Я.Б., Франк-Каменецкий Д.А. Теория теплового распространения пламени. Физическая химия, 1938, т. 12, № 1.
10. Саламатов В.Г., Цыба Г.А., Кирдяшкин А.И., Максимов Ю.М. Телевизионная система определения динамических тепловых полей в процессах СВС. Измерительная техника, 2002, № 9, с. 41.
11. Кирдяшкин А.И., Китлер В.Д., Саламатов В.Г., Юсупов Р.А., Максимов Ю.М. Капиллярные гидродинамические явления в процессе безгазового горения. Физика горения и взрыва, 2007, т. 43, № 6, с. 31 – 39.
12. Мазной А.С., Кирдяшкин А.И., Максимов Ю.М. Методики стереометрического анализа морфологии пористых проницаемых материалов. Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия, 2011, № 3, с. 44 – 50.
13. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография (Стереология металлических материалов). М.: Металлургия, 1976, 272 с.
14. Varma A., Rogachev A.S., Mukasyan A.S., Hwang S. Complex behavior of self-propagating reaction waves in heterogeneous media. Proc.Natl.Acad.Sci.USA, 1998, no. 95, p. 11053 – 11058.
15. Юсупов Р.А., Кирдяшкин А.И., Максимов Ю.М. Закономерности СВС пористой композиционной керамики и металлокерамики. Горение и плазмохимия, 2003, т. 1, № 4, с. 351 – 356.
16. Максимов Ю.М., Пак А.Т., Лавренчук Г.В., Найбороденко Ю.С., Мержанов А.Г. Спиновое горение безгазовых систем. Физика горения и взрыва, 1979, № 3, с. 156 – 159.
17. Мержанов А.Г., Мукасян А.С. Твердопламенное горение. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2007, 336 с.
18. Шкадинский К.Г., Хайкин Б.И., Мержанов А.Г. Распространение пульсирующего фронта экзотермической реакции в конденсированной фазе. Физика горения и взрыва, 1971, № 1, с. 19 – 28.
19. Максимов Ю.М., Кирдяшкин А.И., Гуштин А.Н., Баев Л.С., Сидоров Ю.М., Гуштин Д.А. Универсальный пористый насадок для беспламенной газовой горелки. Патент № 2310129. 2007. Бюл. №31.
20. Кирдяшкин А.И., Максимов Ю.М., Гуштин А.Н., Баев Л.С., Юсупов Р.А. Способ изготовления крупногабаритных огнеупорных труб. Патент РФ № 2318633. 2008. Бюл. №3.

Статья поступила в редакцию 16.02.2012 г.

Мазной Анатолий Сергеевич — Отдел структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН, научный сотрудник. Специалист в области самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, пористых материалов, стереометрической металлографии. E-mail: maznoy_a@mail.ru.

Кирдяшкин Александр Иванович — Отдел структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией. Специалист в области химической физики, макрокинетики, горения, взрыва, синтеза, излучения. E-mail: maks@fisman.tomsk.ru.

Китлер Владимир Давыдович — Отдел структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник. Специалист в области процессов тепло- и массообмена, равновесия и кинетики процессов в химически реагирующих системах. E-mail: kitler_1@mail.ru.

Максимов Юрий Михайлович — Отдел структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН, доктор физико-математических наук, профессор, руководитель отдела, заместитель председателя президиума ТНЦ СО РАН. Специалист в области химической физики, химической кинетики, горения, взрыва, неравновесных состояний, самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, излучения. E-mail: maks@fisman.tomsk.ru.

Юсупов Рашид Анварбекович — Отдел структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Специалист в области химической физики, макрокинетики, горения, взрыва, синтеза. E-mail: rash1956@yandex.ru.