

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОДУКТОВ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А. И. Кирдяшкин, Ю. М. Максимов, В. Д. Китлер, О. К. Лепаква,
В. В. Буркин*, С. В. Синяев*

Томский филиал Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН,
634050 Томск

* НИИ прикладной математики и механики, 634050 Томск

Исследуется горение уплотненных смесей Ni+16% Al, Ni+50% Al, Co+30% S, Ti+58% FeV, Ti+20% C, FeO+10% Fe+18% Al в постоянном магнитном поле. Показано отсутствие влияния магнитного поля на скорость горения исследуемых систем. Обнаружено увеличение глубины превращения и укрупнение геометрических размеров фазовых составляющих конечного продукта реакции под действием поля в системах, содержащих ферромагнитный металл. Изменения продукта реакции связаны с дополнительным массопереносом за волной самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

Ранее проведенные исследования [1] показали, что самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) порошковых смесей насыпной плотности ферромагнитный металл + сера, металл + алюминий в магнитном поле индукцией до 0,17 Тл имеет ряд особенностей. Под действием магнитного поля скорость синтеза может уменьшаться и возрастать в 2–3 раза, расширяются концентрационные и геометрические пределы горения, макроструктура продуктов синтеза приобретает анизотропный характер, повышается глубина химического превращения продуктов. Наблюдаемые эффекты объясняются перегруппировкой ферромагнитных частиц смеси в направлении поля. Это ведет к изменению теплопроводности, масштаба гетерогенности системы и, как следствие, к изменению параметров СВС. В уплотненных смесях перегруппировка исходных частиц в магнитном поле затруднена их взаимным сцеплением и изменения скорости СВС не наблюдалось. Тем не менее было замечено некоторое влияние магнитного поля на структуру конечных продуктов [2].

В настоящей работе продолжены исследования влияния магнитного поля на структурообразование СВС-материалов. Предметом исследований являются уплотненные порошковые смеси, для которых эффект магнитной перегруппировки исходных компонентов практически исключен.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Использовалось постоянное магнитное поле с индукцией до 1,9 Тл. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Цилиндрические образцы уплотненной порошковой смеси (пористость 40 ÷ 55 %) в кварцевой оболочке помещали в зазор электромагнита. Электромагнит включался до инициирования процесса нагревой электроспиралью и выключался через 3 ÷ 4 мин после прохождения волны СВС. Синтез проводился в порошковых смесях никель + алюминий, кобальт + сера, сплав железа с бором + титан, титан + углерод, где в качестве исходных ком-

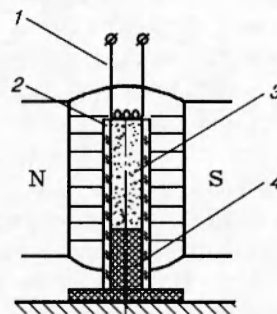


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — запальная спираль, 2 — кварцевая трубка, 3 — порошковая смесь, 4 — подставка, S, N — полюса электромагнита

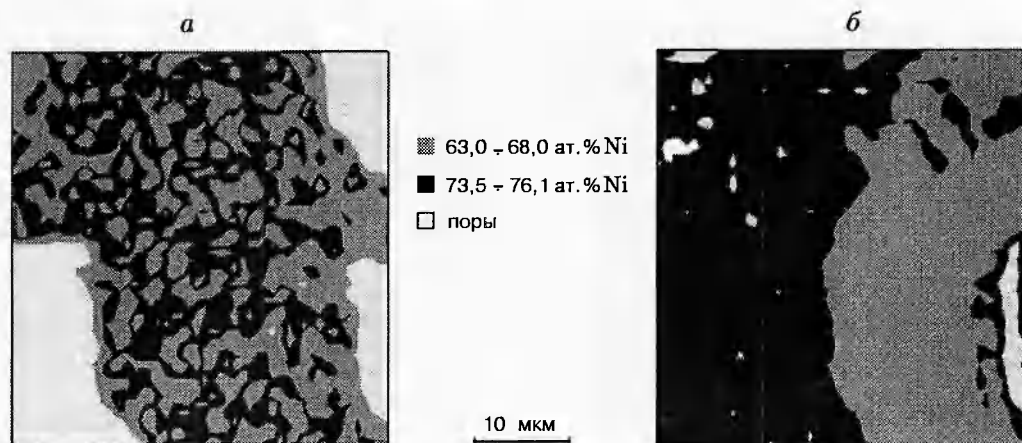


Рис. 2. Карта распределения никеля в продуктах СВС смеси Ni+16% Al (по массе):
а — синтез в обычных условиях, б — в магнитном поле

понентов использовали промышленные порошки никеля ПНК0Т, алюминия АСД-4, кобальта ПК-1, титана ПТЭМ-1, сажи ПМ-15, серы, сплав FeВ (21,0% В по массе).

Продукты синтеза исследовали с использованием светооптической металлографии, рентгенофазового и микрорентгеноспектрального анализов. При проведении микрорентгеноспектрального анализа применен режим сканирования, позволяющий получить двумерную картину распределения концентрации элементов. Суть метода состоит в автоматизированном измерении концентрации в множестве равноудаленных точек образца (использовалось 1600 точек) в пределах заданного участка поверхности с последующей компьютерной обработкой данных. Принципиальным этапом обработки данных является построение линий равной концентрации (изолиний), которые в идеальном случае совпадают с границами раздела фазовых составляющих, а картина распределения соответствует расположению реальных фаз в образце. В силу ограниченности точности измерения концентрации ($\pm 0,2 \div 0,5$ ат.%) и пространственного разрешения ($2 \div 3$ мкм) не всегда удавалось выделить границы раздела фаз, близких по химическому составу, а также мелкодисперсных фаз. Поэтому при интерпретации результатов принималось, что получаемая картина распределения концентрации соответствует расположению псевдофаз — областей с заданными интервалами измеряемой концентрации элементов. Псевдофаза может соответствовать одной конкретной химической фазе, а

также может быть областью мелкодисперсной смеси фаз (эвтектики, перитектики и др.) или смеси фаз близкого химического состава.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Как показали эксперименты, линейная скорость синтеза исследуемых порошковых систем составляет $2 \div 10$ мм/с и практически не меняется при включении электромагнита. Последнее свидетельствует об отсутствии влияния постоянного поперечного магнитного поля на кинетику основных химических превращений в волне СВС. С другой стороны, обнаружено заметное видоизменение состава и структуры конечных продуктов реакции под действием поля, что, по-видимому, реализуется на этапе формирования материала за волной СВС.

Смесь Ni + 16% Al (по массе). Согласно данным рентгенофазового анализа продукты синтеза состоят из фаз Ni_3Al , Ni_2Al_3 , Ni, NiAl. Металлографический и микрорентгеноспектральный анализы показывают, что материал представляет собой пористый композит, структура которого характеризуется двумя чередующимися псевдофазами, содержащими $73,5 \div 76,1$ ат.% Ni и $63,0 \div 68,0$ ат.% Ni (рис. 2). В отдельных местах композита имеются участки, обогащенные никелем до 80 ат.%. Первая псевдофаза по составу близка к соединению Ni_3Al , состав второй определяется, по-видимому, смесью различных мелкодисперсных фаз. Характер наблюдаемой микроструктуры и вид фазовых равновесий по диаграмме состояния системы Ni-Al [3] указывает

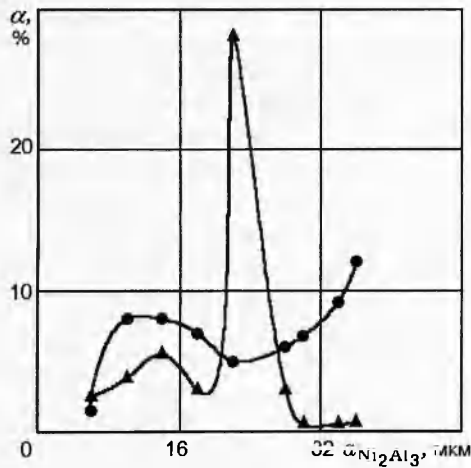


Рис. 3. Распределение областей Ni_2Al_3 по размерам в продуктах СВС смеси $Ni + 50\% Al$ (по массе):

▲ — синтез в обычных условиях, ● — в магнитном поле; a — размер областей Ni_2Al_3 , α — их объемная доля

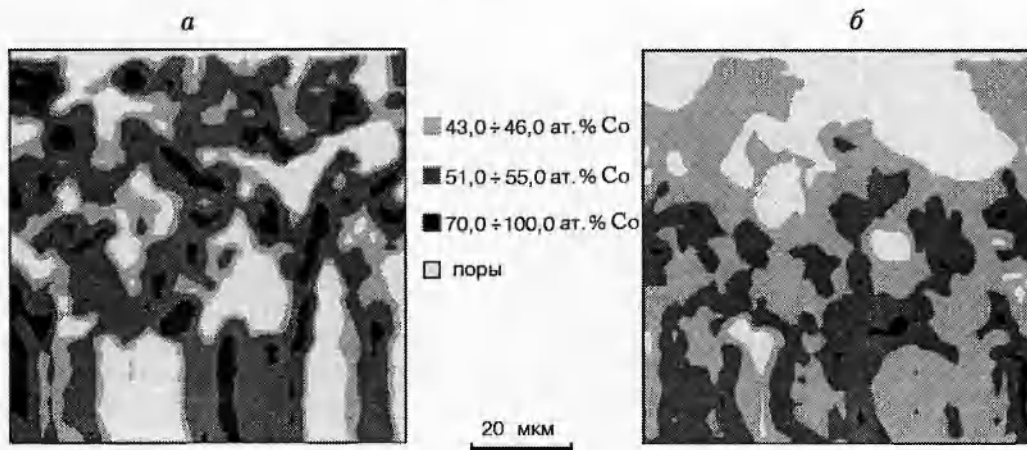


Рис. 4. Карта распределения кобальта в продуктах СВС смеси $Co + 30\% S$ (по массе):

a — синтез в обычных условиях, b — в магнитном поле

на то, что формирование состава происходило путем кристаллизации высокотемпературного расплава по эвтектическому и перитектическому механизмам. Сравнительный анализ продуктов показывает, что под действием магнитного поля снижается количество чистого никеля, что свидетельствует о повышении глубины химического превращения компонентов. Под действием поля наблюдается пространственное разделение и укрупнение геометрических размеров псевдофаз (см. рис. 2).

Смесь $Ni + 50\% Al$. По данным анализов продукты синтеза состоят из фаз Ni_2Al_3 и $NiAl_3$, структура материала характеризуется двумя чередующимися псевдофазами, по составу близкими к Ni_2Al_3 и $NiAl_3$. Под действием магнитного поля размер структурных составляющих увеличивается. В магнитном по-

ле размер областей Ni_2Al_3 увеличивается примерно в два раза, изменяется качественный характер распределения для областей размером более 30 мкм, которые при синтезе в обычных условиях практически отсутствуют (рис. 3).

Смесь $Co + 30\% S$. Согласно рентгенофазовому анализу продукт синтеза состоит из смеси фаз Co_9S_8 , Co_3S_4 . Структура материала носит следы плавления при синтезе и представляет собой композицию трех псевдофаз: 43,0 ÷ 46,0 ат.% Co , 51,0 ÷ 56,0 ат.% Co , 70,0 ÷ 100,0 ат.% Co (рис. 4). Первые две псевдофазы по составу близки к Co_3S_4 и Co_9S_8 соответственно, последняя, по-видимому, является смесью кобальта и сульфидов. Из рис. 4 видно, что под действием магнитного поля происходит укрупнение структурных элементов материала, изменяется соотношение псевдофаз в

сторону увеличения доли областей, обогащенных серой. Это согласуется с данными рентгенофазового анализа, показывающего уменьшение количества Co_9S_8 и увеличение Co_3S_4 в продуктах синтеза в поле.

Смесь Ti + 58 % FeV. Согласно рентгенофазовому анализу продукт синтеза состоит из смеси TiV_2 , Fe_2V , FeV , Fe . Структура продукта носит следы плавления при синтезе и представляет собой композицию зерен TiV_2 , окруженную матрицей из смеси Fe и других фаз. Под действием магнитного поля снижается количество фазы FeV , т. е. увеличивается глубина химического превращения исходного ферроборного сплава, происходит укрупнение и объединение зерен TiV_2 .

Смесь Ti + 20 % C. Продукт синтеза представляет собой фазу TiC . Изменений структуры и фазового состава под действием магнитного поля не обнаружено.

К причинам изменения состава и структуры продуктов синтеза в магнитном поле можно отнести явление магнитофореза гетерогенных систем [4] и связанный с ним дополнительный массоперенос компонентов. В результате магнитофореза происходят пространственное разделение жидких и твердых фаз, сближение и объединение растущих из расплава микрокристаллов в продуктах реакции за волной СВС. Взаимное движение фазовых составляющих системы интенсифицирует диффузионный массоперенос. Явление связано с появлением дополнительного давления на границе раздела фаз в магнитном поле: $\Delta p \sim (I_1^2 - I_2^2)$, где I_1, I_2 — намагниченности фаз, которое при наличии неоднородности поля создает силу, подобную архимедовой, вызывающую разделение жидких и твердых фаз. Эффект пропорционален разнице магнитных свойств фаз и, естественно, ослабляется при наличии слабо магнитных компонентов. Последнее, по-видимому, объясняет отсутствие воздействия поля на продукты синтеза в системе $\text{Ti}-\text{C}$.

Эффект магнитного разделения фаз подтверждается значительным увеличением полноты отделения железа от шлака при горении металлокерамической системы $\text{FeO} + 10\% \text{Fe} + 18\% \text{Al}$. Продукты горения системы — железо и оксид алюминия — значительно отличаются магнитными свойствами. Как показали лабораторные эксперименты, в магнитном поле полнота отделения металла от шлака возрастает от 45 до 65 % по отношению к расчетному показателю.

ВЫВОДЫ

Использование магнитного поля с индукцией до 1,9 Тл позволяет заметно видоизменять состав и структуру продуктов СВС уплотненных порошковых смесей, содержащих ферромагнитный компонент. Наблюдаемые эффекты связаны с возникновением дополнительного массопереноса в продуктах реакции за волной СВС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кирдяшкин А. И., Максимов Ю. М., Мержанов А. Г. Влияние магнитного поля на горение гетерогенных систем с конденсированными продуктами реакции // Физика горения и взрыва. 1986, Т. 22, № 6. С. 65–72.
2. Кирдяшкин А. Н., Максимов Ю. М., Чекулкина О. Д. К возможности влияния магнитного поля на структурообразование СВС-материалов // Самораспространяющийся высокотемпературный синтез / Под ред. Ю. М. Максимова. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1991. С. 56–62.
3. Вол А. Е. Строение, свойства двойных металлических систем. М.: Физматгиз, 1959. Т. 1.
4. Блум Э. Я., Михайлов Ю. А., Дзоле Р. Я. Тепло- и массообмен в магнитном поле. Рига: Знание, 1980.

Поступила в редакцию 9/VII 1998 г.,
в окончательном варианте — 28/XII 1998 г.