

ОСОБЕННОСТИ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СПЕКАНИИ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ЯЧЕИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ Fe-Cr-Al

*В.Г. ГИЛЕВ, канд. техн. наук
И.Н. БАРЫШНИКОВ, аспирант
(ПНИПУ, г. Пермь)*

Поступила 10 августа 2015
Рецензирование 29 апреля 2016
Принята к печати 15 мая 2016

Гилев В.Г. – 6140990, г. Пермь – ГСП, Комсомольский проспект, 29
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
e-mail: Xray@pm.pstu.ac.ru

Высокопористый проницаемый ячеистый материал (ВПЯМ) на хромалевой основе перспективен в качестве носителя катализаторов глубокого окисления метана. Использование в качестве основы материала жаростойких сплавов Fe-Cr-Al позволяет применять такие носители катализаторов при температурах до 900 °С на воздухе в среде газообразных продуктов сгорания. ВПЯМ-хромаль – основа для получения катализаторов беспламенного горения метана для экологически безопасных теплогенераторов. Высокопористый ячеистый материал на хромалевой основе получают методами порошковой металлургии путем репликации пространственной структуры полимерного ячеистого материала. Материал получали из шликера на основе смеси порошков карбонильного железа и лигатуры состава (вес.%) 20 % Fe – 60 % Cr – 20 % Al с добавкой 1,5 % дисперсного порошка Co. Технология включает помол лигатуры, смешивание шихты, приготовление и нанесение на полимерный каркас шликера, предварительный отжиг в водороде со ступенчатым нагревом до 700 °С для деструкции и удаления полимера и окончательное спекание в вакууме при 1270 °С.

Приведены результаты исследования фазового состава на различных стадиях получения ВПЯМ. После промежуточного отжига фиксируются три ОЦК-фазы, отличающиеся параметрами решетки. После окончательного спекания остается только одна ОЦК-фаза твердого раствора хрома и алюминия в железе и присутствует примесь карбида хрома Cr_7C_3 .

Ключевые слова: высокопористые ячеистые материалы, хромаль, Fe-Cr-Al, беспламенное горение метана.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-51-58

Введение

Высокопористый ячеистый материал (ВПЯМ) на основе хромали используется для создания энергетического каталитического реактора – парогенератора, работающего на газе, с блочным инфракрасным каталитическим тепловыделяющим элементом для производства тепла. Пластины из ВПЯМ-хромали при этом используются как теплоэнергетический элемент: каталитический реактор-парогенератор, позволяющий проводить беспламенное глубокое окисление топли-

ва при температурах в реакторе ниже 1000 °С, что практически полностью исключает образование оксидов азота NO_x , а также CO [1, 2]. ВПЯМ-хромаль является альтернативой керамических ячеистых материалов [3].

Другим перспективным применением ВПЯМ системы Fe-Cr-Al являются структурированные носители катализаторов для превращения природного газа и биотоплива в сингаз и водород [4] и глубокого окисления метана [5, 6]. Рабочие температуры ВПЯМ-хромали при этом лежат в среднем интервале температур (600...800 °С),

где они могут конкурировать с материалами аналогичной структуры на основе керамик [7].

Для высоких температур эксплуатации до 1000 °С и для совместимости с каталитическими покрытиями необходимы специальные составы сплава и предварительная обработка материала. Сплавы NiFeCrAl и FeCrAl являются перспективными кандидатами в отношении устойчивости к окислению из-за того, что в них содержится алюминий, что позволяет сформировать слой оксида алюминия, который и обеспечивает сопротивление долгосрочному окислению при температурах больше 950 °С [8, 9].

Материалы системы Fe-Cr-Al интенсивно исследуются в компактном состоянии в виде напыленных защитных покрытий, а также в виде пористых проницаемых материалов. Большое внимание уделяется изучению процесса окисления, поиску легирующих элементов, повышающих стойкость к окислению, исследованиям состава и структуры оксидных пленок [10–15]. Так, для высокопористого материала из волокон FeCrAl показано, что малое количество добавки Si ведет к значительному улучшению стойкости к окислению [16]. Для ВПЯМ Fe-Cr-Al, получаемых методом порошковой металлургии, стойкость к окислению возрастает с уменьшением пористости стенок перемычек [9]. Поэтому получение более плотной структуры в элементах каркаса ВПЯМ благоприятно не только для достижения более высоких механических свойств, но и для достижения лучшей стойкости к окислению. Наличие тех или иных фаз на той или иной стадии спекания может оказывать влияние на процесс уплотнения.

Технология получения ВПЯМ-хромаль разработана недавно [17, 18] и требует дальнейшего совершенствования. Закономерности и рекомендации по составу, найденные для компактных и пористых волокнистых материалов, требуют уточнения при получении ВПЯМ методами шликерной порошковой технологии. Это обусловлено специфическими требованиями: 1) достижением некоторого уровня прочности после предварительного отжига, необходимого для перемещения ВПЯМ из печи в печь; 2) достижением удовлетворительной плотности структуры перемычек после окончательного спекания; 3) достижением экономической эффективности за счет использования доступных порошков.

Цель настоящей работы – изучение закономерностей фазо- и структурообразования в процессе подготовки шихты и на стадиях термообработки.

Методика проведения исследований

Для получения образцов ВПЯМ-хромаль использовали порошки карбонильного железа Р-20, лигатуры Fe₂₀Cr₆₀Al и добавка высокодисперсного порошка кобальта в соотношении для получения состава Fe – 18 % Cr – 6 % Al – 1,5 % Co. Порошок лигатуры подвергали помолу в атмосфере аргона в вибромельнице MB0,005 в течение 32 ч при навеске 1,5 кг и соотношении порошок/шары = 1/10. После смешивания в шихту вводили раствор ПВС для получения шликера. Полиуретановую ячеистую структуру готовили из вспененного полиуретана по стандартной методике [19]. Затем проводили пропитку полиуретановой ячеистой структуры шликером с последующим обжатием на валках для удаления избытка шликера. Термообработку проводили при температурах до 700 °С в водороде в течение 0,5 ч с промежуточными выдержками: при 350 °С – 3 ч и при 550 °С – 2 ч. Окончательное спекание проводили в вакууме с изотермической выдержкой при 1270 °С – 2 ч. Скорость охлаждения после окончательного спекания до 500 °С составляла величину 2,5 °/мин.

Съемку для рентгеноструктурного анализа осуществляли на дифрактометре XRD-6000 фирмы SHIMADZU с использованием Cu K α -излучения в режиме сканирования при скорости 2 град/мин. Обработка рентгенограмм включает в себя:

- качественный фазовый анализ – в программе Crystallographica Search-Match (CSM) с использованием файлов PDF, картотеки the International Centre for Diffraction Data (ICDD);

- количественный анализ, который включал определение процентного содержания в образце различных кристаллических фаз, определение параметров кристаллических решеток фаз, определение величины размеров блоков и напряжений по ширине рентгеновских линий – в программе PowderCell 2.4. с использованием аппроксимирующей функции Pseudo-Voigt 1.

Для рентгеносъемки образцы ВПЯМ после предварительного спекания при 700 °С перево-

дили в порошок при минимуме деформации, а образцы ВПЯМ после окончательного спекания при 1270 °С сминали под прессом.

Для исследования микроструктуры перемычек ВПЯМ пустоты в материале заполняли эпоксидным клеем с использованием вакуумной пропитки. Структуру на шлифах исследовали на оптическом микроскопе Axiovert 40 MAT фирмы Карс Цейс. Для выявления микроструктуры использовали 5 %-й водный раствор азотной кислоты.

Результаты исследований и обсуждение

Рентгенограмма от исходной шихты включала линии от двух ОЦК-фаз с отличающимися параметрами решетки, которые соответствуют исходным порошкам железа и лигатуры (рис. 1). Ширина линий соответствует исходной структуре порошков, отличающейся высоким уровнем напряжений и малому размеру областей когерентного рассеяния (ОКР) (табл. 1). Детальный анализ фазового состава лигатуры, однако, показал, что кроме твердого раствора на основе ОЦК-фазы в сплаве присутствует в небольших количествах фаза $AlCr_2$, может присутствовать фаза Fe_3Al , линии которой накладываются на линии основной фазы. Неоднородное многофазное состояние материала лигатуры, состоящего из близких по структуре фаз, вносит искажения в результаты определения параметров решетки, размеров ОКР и микронапряжений. Это можно продемонстрировать строчкой 2* в табл. 2. В отличие от строчки 2 анализ проводился в пред-

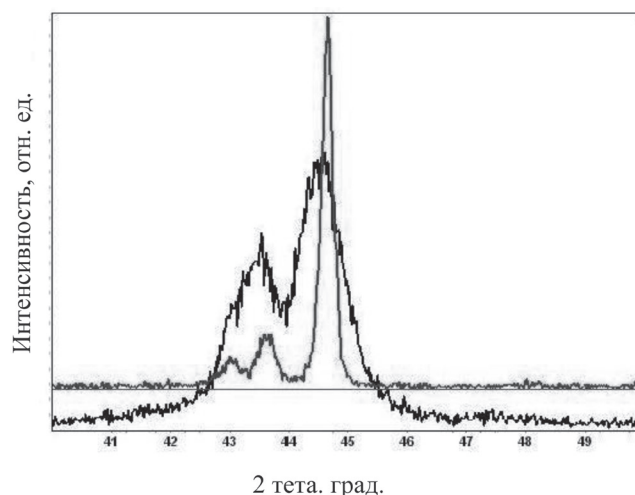


Рис. 1. Фрагменты дифрактограмм от исходной шихты и от материала ВПЯМ-хромаль после спекания при 700 °С

положении, что материал состоит из трех фаз: твердого раствора на основе фазы ОЦК, $FeAl$ и $AlCr_2$. Параметры решетки ОЦК в строчках 2 и 2* и размеры ОКР близки, а размер микронапряжений значительно уменьшился.

После стадии удаления полиуретановой подложки и предварительного спекания в водороде при температуре 700 °С вид рентгенограмм претерпевает значительные изменения. Прежде всего можно отметить уменьшение ширины линий фазы, соответствующей исходному порошку железа, что соответствует снятию напряжений и увеличению величины ОКР вследствие рекристаллизации. Вместо широкой линии, соответствующей исходному порошку лигатуры, расположены две линии двух ОКР-фаз.

Таким образом, после предварительного спекания фиксируется существование трех ОЦК-

Таблица 1

Состав и подготовка образцов

Номер образца	Состав образца, состояние	Стадия обработки
1	Исходный порошок карбонильного железа Р-20	Состояние поставки
2	Исходный порошок лигатуры FX6020A	Помол в мельнице, в течение 24 ч
3	Шихта исходная для получения ВПЯМ хромаль	Смешивание
4	ВПЯМ-хромаль, состояние после отжига в водороде при 700 °С, разрушение структуры ВПЯМ	Пиролиз полиуретановой подложки и отжиг ВПЯМ в водороде при 730 °С – 1 ч
5	ВПЯМ, спеченный в вакууме при 1270 °С	Спекание в вакууме при 1270 °С

Таблица 2

Структурное состояние образцов

Номер образца	Fe				Fe-Cr-Al -2				Fe-Cr-Al				FeAl	AlCr ₂
	Доля фазы, об. %	a, Å	ОКР, нм	Δa/a, %	Доля фазы, об. %	a, Å	ОКР, нм	Δa/a, %	Доля фазы, об. %	a, Å	ОКР, нм	Δa/a, %	Доля фазы, об. %	Доля фазы, об. %
1	100	2,865	19	0,56										
2									100	2,955	21	0,48		
2*									48,6	2,954	22	0,15	44,6	6,8
3	52	2,881	26	0,7					48	2,957	64	0,8		
4	66,3	2,867	91	0,044	19,4	2,928	14	0,25	14,3	2,957	25	0,15		
5		2,8919	43	0,067										

фаз, отличающихся параметрами решетки вследствие различий в химическом составе.

После окончательного спекания в вакууме при 1270 °С линия основной фазы сдвигается влево, исчезает линия от ОЦК-фазы промежуточного состава (рис. 2), что соответствует растворению легирующих из порошка лигатуры в железе и выравниванию концентрационных неоднородностей в структуре спеченного материала и образованию почти во всем объеме однородного твердого раствора.

Однако материал остается не полностью однородным, судя по наличию слабых линий карбида хрома (рис. 3).

Слабые линии, видимые на рентгенограмме образца, спеченного при 1270 °С (рис. 3), относятся к линиям карбида хрома Cr₇C₃, что следует из сопоставления данных экспериментальной рентгенограммы с данными картотеки

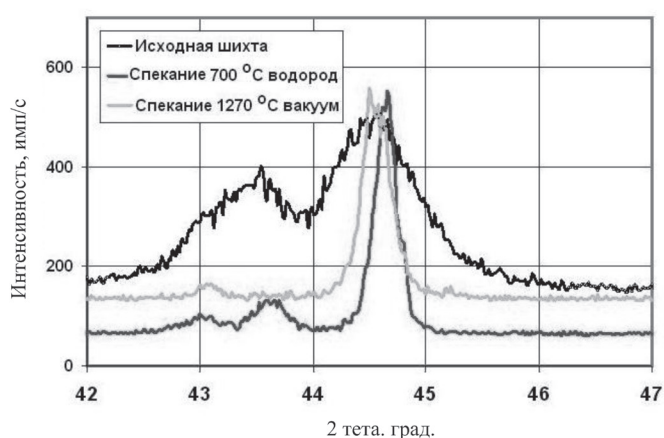


Рис. 2. Фрагменты дифрактограмм от исходной шихты и от материала ВПЯМ-хромаль в районе наиболее интенсивной первой линии ОЦК-фаз после предварительного и окончательного спекания

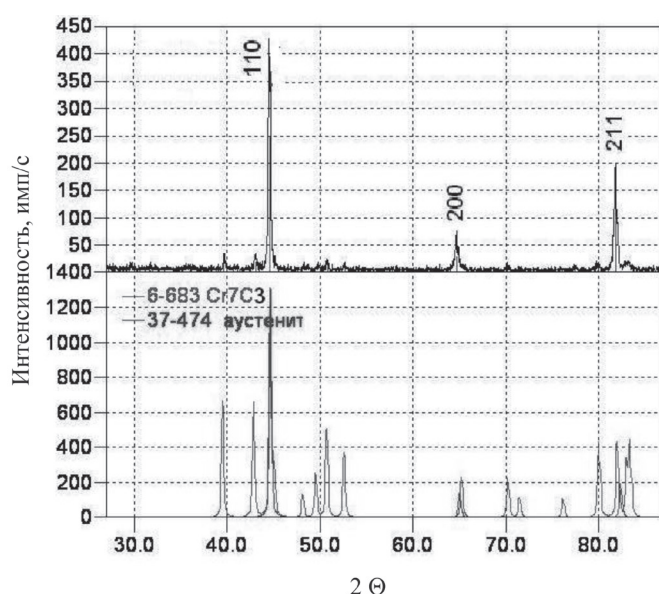


Рис. 3. Дифрактограмма от ВПЯМ-хромаль после окончательного спекания

PDF 6-683, табл. 3. В микроструктуре материала перемычек, остаются поры (рис. 4).

Очевидно, что единственным источником углерода, необходимого для образования карбида хрома, является углерод, имеющийся в исходной полиуретановой подложке. Во время нагрева шликерной заготовки происходит пиролиз полиуретана. Часть материала полиуретана удаляется в виде летучих углеводородов и водорода. Часть углерода в условиях эксперимента, по-видимому, остается в рентгеноаморфном виде после промежуточных выдержек при 350 и 550 °С и может служить помехой для уплотнения на стадии перепакровки частиц, препятствовать контакту между частицами разного химического состава, диффузии и выравниванию химического состава при более высоких температурах спекания в вакууме.

Расшифровка рентгенограммы от образца ВПЯМ-хромаль, после окончательного спекания при 1270 °С

Номер образца	ВПЯМ-хромаль 1270 °С			Fe ГЦК-фаза			Cr ₇ C ₃ PDF 6-683		
	2 Θ	d , Å	I	d , Å	I	hkl	d , Å	I	hkl
1	39,64	2,27	7,042				2,2800	50	—
2	43,06	2,10	7,277				2,1100	50	—
3	44,5	2,04	100,000	2,0280	100	110	2,0300	100	—
4	50,72	1,80	5,164				1,8000	40	—
5	64,64	1,44	15,493	1,4340	12	200			—
6	79,78	1,20	2,347				1,1990	40	—
7	81,75	1,18	43,192	1,1708	18	211	1,1750	40	—
8	83,08	1,16	2,347				1,1630	30	—
9	98,07	1,02	11,502	1,0139	5	220			—

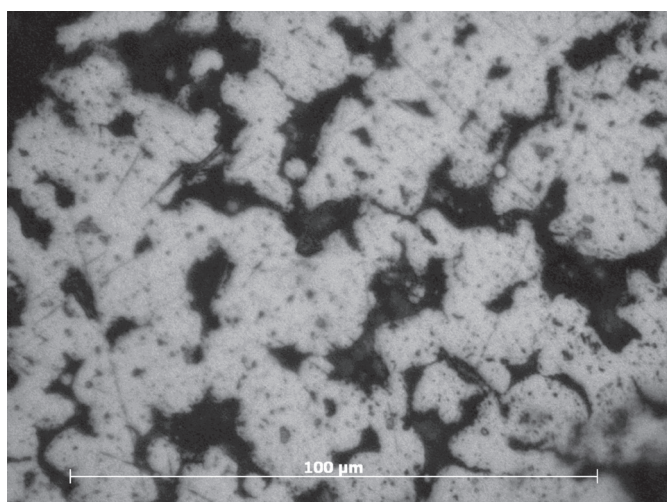


Рис. 4. Микроструктура ВПЯМ-хромаль после окончательного спекания

Механизмом удаления углерода на первой стадии спекания (в водороде) может быть взаимодействие твердого углерода с газообразным водородом с образованием метана в присутствии катализатора – железа [20, 21]. Можно предположить, что выдержка 0,5 ч при 700 °С в водороде недостаточна для полного удаления углерода из заготовки.

Выводы

Проведено рентгенографическое исследование исходных порошков, шихты и материала ВПЯМ-хромаль Fe-Cr-Al после промежуточного при 700 °С и окончательного при 1270 °С спекания. Исходные порошки и спеченный материал состоят в основном из фаз с ОЦК-решеткой на

основе железа и хрома. Обнаружено, что на промежуточной стадии образуется еще одна фаза с ОЦК-решеткой, по-видимому, промежуточного состава. На окончательно спеченном образце кроме ОЦК-фазы твердого раствора на основе железа фиксируются следы присутствия фазы, карбида хрома Cr₇C₃, что говорит о неполном удалении углерода на стадии пиролиза полиуретана и предварительного спекания в водороде.

Список литературы

1. Высокопористые проницаемые ячеистые материалы для экологически безопасных теплогенераторов / В.Н. Анциферов, В.Д. Храмцов, А.И. Поливода, Э.П. Волков, Г.А. Цой, А.П. Бевз // Перспективные материалы. – 2008. – № 6. – С. 5–10.
2. Тепловыделяющие каталитические блоки беспламенного горения на основе жаростойкого сплава / В.Н. Анциферов, Г.А. Цой, А.П. Бевз, А.И. Поливода // Технология металлов. – 2010. – № 8. – С. 25–32.
3. Tierney C., Harris A.T. Materials design and selection issues in ultra-lean porous burners // Journal of the Australian Ceramic Society. – 2009. – Vol. 45 (2). – P. 20–29.
4. Sadykov V.A. Structured nanocomposite catalysts of biofuels transformation into syngas and hydrogen: design and performance // Second International Conference Catalysis for renewable sources: fuel, energy, chemicals CRS-2: abstracts, Lund, Sweden, 22–28 July 2013. – Novosibirsk, 2013. – P. 12–13.
5. Catalytic partial oxidation of methane over nano-sized Rh supported on Fecralloy foams / E. Verlato, S. Barison, S. Cimino, F. Dergal, L. Lisi, G. Mancino, M. Musiani, L. Vazquez-Gomez // International Jour-

nal of Hydrogen Energy. – 2014. – Vol. 39, iss. 22. – P. 11473–11485. – doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.076.

6. Солнышков И.В., Порозова С.Е. Каталитическая активность высокопористого материала на основе сплава хромаль в реакции глубокого окисления метана // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 105.

7. Высокопористые ячеистые керамические материалы / В.Н. Анциферов, В.И. Овчинникова, С.Е. Порозова, И.В. Федорова // Стекло и керамика. – 1986. – № 9. – С. 19.

8. A new PM Process for manufacturing of alloyed foams for high temperature applications / G. Walther, B. Klöden, B. Kieback, R. Poss, Y. Bienvenu, J.-D. Bartout // World PM2010 Proceedings. – Shrewsbury, UK, 2010. – Vol. 4. – P. 109–116.

9. Open cell metal foams – application-oriented structure and material selection / P. Quadbeck, K. Kümmel, R. Hauser, G. Standke, J. Adler, G. Stephani // CELLMAT 2010. Proceedings of the International Conference on Cellular Materials, Dresden, Germany, 27–29 October 2010. – Dresden, 2010. – P. 279–288.

10. Effect of trace amounts of carbon and nitrogen on the high temperature oxidation resistance of high purity FeCrAl alloys / D. Naumenko, J. Le-Coze, E. Wessel, W. Fischer, W.J. Quadackers // Materials Transactions. – 2002. – Vol. 43, N 2. – P. 168–172.

11. Engkvist J. Characterization of oxide scales formed on FeCrAl alloys at high temperatures: doctoral thesis. – Göteborg: Chalmers University of Technology, 2009. – 53 p. – ISBN 978-91-7385-310-1.

12. High temperature oxidation of FeCrAl-alloys – influence of Al-concentration on oxide layer characteristics / J. Engkvist, U. Bexell, M. Grehk, M. Olsson // Materials and Corrosion. – 2009. – Vol. 60, iss 11. – P. 876–881. – doi: 10.1002/maco.200805186.

13. Oxidation of FeCrAl alloys at 500–900 °C in dry O₂ / H. Josefsson, F. Liu, J.-E. Svensson, M. Halvarsson, L.-G. Johansson // Materials and Corrosion. – 2005. – Vol. 56, iss. 1. – P. 801–805. – doi: 10.1002/maco.200503882.

14. Fireside corrosion degradation of HVOF thermal sprayed FeCrAl coating at 700–800 °C / T. Hussain, N.J. Simms, J.R. Nicholls, J.E. Oakey // Surface & Coatings Technology. – 2015. – Vol. 268. – P. 165–172. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2015.01.074.

15. Characterization of alumina scale formed on Fe-CrAl steel / K. Reszka, J. Morgiel, Z. Żurek, A. Jaroń // Archives of Metallurgy and Materials. – 2014. – Vol. 59, N 1. – P. 73–81. – doi: 10.2478/amm-2014-0013.

16. Advanced porous structures made from intermetallic and superalloy fibers / O. Andersen, C. Kostmann, G. Stephani, G. Korb // Proceedings of the 1st International Conference on Materials Processing for Properties and Performance “MP3 2002”, Singapore, 1–3 August 2002. – Singapore, 2002. – P. 214–221.

17. Анциферов В.Н., Баширцев Г.В. Исследование процессов формирования жаростойкого ВПЯМ сплава хромаль, как носителя нанодисперсного катализатора в кластерной теплоэнергетике // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2010. – Т. 12, № 1. – С. 7–16.

18. Баширцев Г.В., Храмцов В.Д. Активация процессов гомогенизации и спекания высокопористых проницаемых ячеистых материалов на основе жаростойких сплавов введением нанопорошков // Третья Всероссийская конференция по наноматериалам НАНО 2009, Екатеринбург, 20–24 апреля 2009 г.: тезисы докладов. – Екатеринбург, 2009. – С. 813–814.

19. Анциферов В.Н., Храмцов В.Д. Способы получения и свойства высокопористых проницаемых ячеистых металлов и сплавов // Перспективные материалы. – 2000. – № 5. – С. 56–60.

20. Взаимодействие алмаза с ультрадисперсным порошком железа, полученным различными способами / А.И. Чепуров, В.М. Сонин, А.А. Чепуров, Е.И. Жимулев, Б.П. Толочко, В.С. Елисеев // Неорганические материалы. – 2011. – Т. 47, № 8. – С. 957–961.

21. Анциферов В.Н., Гилев В.Г., Костилов В.И. Взаимодействие фуллерена C₆₀ с порошковым железом // Перспективные материалы. – 1998. – № 3. – С. 5–10.

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2 (71), April – June 2016, Pages 51–58

Special features of the phase formation during sintering of high porous cellular materials of the Fe-Cr-Al system

Gilev V.G., Ph.D. (Engineering), Senior researcher, e-mail: Xray@pm.pstu.ac.ru

Baryshnikov I.N., Scientific associate, Post-graduate Student, e-mail: ivanbin@mail.ru

Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russian Federation

Abstract

The highly permeable cellular material (HPCM) based on chromal is promising as a carrier of deep methane oxidation catalysts. Using HPCM as a base material of heat-resistant Fe-Cr-Al alloys allows to apply such catalysts at temperatures up to 900 °C in the air and in the combustion gas atmosphere. HPCM-chromal is the basis for flameless combustion of methane catalysts for environmental friendly heat generators. HPCM based on Fe-Cr-Al is used as the heat and power unit the catalytic reactor-steam generator, allowing performing deep flameless oxidation of the fuel in the reactor at temperatures below 1000 °C, which virtually eliminates the formation of oxides of nitrogen NO_x and CO. HPCM based on Fe-Cr-Al is obtained by powder metallurgy by replicating the spatial structure of polymeric cellular material.

The materials are prepared from the slurry based on the mixture of carbonyl iron powder and master alloy (wt.%) 20 % Fe-60 % Cr-20 % Al with the addition of 1.5% Co fine powder. Technique involves ligature milling, powders mixing, preparation and application to polymer backbone slurry, preliminary annealing in hydrogen, with a step by heating to 700°C for decomposition and removal of the polymer and the final sintering in vacuum at 1270 °C.

The results of X-ray study highly porous cellular material of Fe-Cr-Al are showed. The data on the phase composition, the lattice parameters and the fine structure of the starting powder and the charge is showed. Material is investigated after intermediate annealing at 700 °C and after sintering at 1270 °C. After intermediate annealing at 700° material consists of 3 bcc phases with differing parameters. After the final sintering material consists of a bcc phase and impurities of chromium carbide Cr₇C₃.

Keywords

highly porous cellular materials, Fe-Cr-Al, flameless combustion of methane

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-51-58

References

1. Antsiferov V.N., Khramtsov V.D., Polivoda A.I., Volkov E.P., Tsoi G.A., Bevz A.P. Vysokoporistye pronitsaemye yacheistye materialy dlya ekologicheskii bezopasnykh teplogeneratorov [The highly porous breathable cellular material for environmentally friendly heat generators]. *Perspektivnye materialy – Journal of Advanced Materials*, 2008, no. 6, pp. 5–10. (In Russian)
2. Antsiferov V.N., Tsoi G.A., Bevz A.P., Polivoda A.I. Teplovyye yedynitsy dlya bezplamennogo goreniya na osnove zharostoikogo splava [The fuel catalyst units for flameless combustion based on heat-resistant alloy]. *Tekhnologiya metallov – Metal Technology*, 2010, no. 8, pp. 25–32.
3. Tierney C., Harris A.T. Materials design and selection issues in ultra-lean porous burners. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 2009, vol. 45 (2), pp. 20–29.
4. Sadykov V.A. Structured nanocomposite catalysts of biofuels transformation into syngas and hydrogen: design and performance. *Second International Conference “Catalysis for renewable sources: fuel, energy, chemicals” CRS-2: abstracts*, Lund, Sweden, 22–28 July 2013, pp. 12–13.
5. Verlato E., Barison S., Cimino S., Dergal F., Lisi L., Mancino G., Musiani M., Vazquez-Gomez L. Catalytic partial oxidation of methane over nanosized Rh supported on FeCrAlloy foams. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, vol. 39, iss. 22, pp. 11473–11485. doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.076
6. Solnyshkov I.V., Porozova S.E. Kataliticheskaya aktivnost' vysokoporistogo materiala na osnove splava khromal' v reaktsii glubokogo okisleniya metana [Catalytic activity highly porous material based on an Fe-Cr-Al alloy in deep oxidation of methane]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2014, no. 6, p. 105.
7. Antsiferov V.N., Ovchinnikova V.I., Porozova S.E., Fedorova I.V. Vysokoporistye yacheistye keramicheskie materialy [Highly porous cellular ceramic materials]. *Steklo i keramika – Glass and Ceramics*, 1986, no. 9, p. 19. (In Russian)
8. Walther G., Klöden B., Kieback B., Poss R., Bienvenu Y., Bartout J.-D. A new PM process for manufacturing of alloyed foams for high temperature applications. *World PM2010 Proceedings*, 2010, vol. 4, pp. 109–116.
9. Quadbeck P., Kümmel K., Hauser R., Standke G., Adler J., Stephani G. Open cell metal foams – application-oriented structure and material selection. *Proceedings of the International Conference on Cellular Materials “CELL-MAT 2010”*, Dresden, Germany, 27–29 October 2010, pp. 279–288.
10. Naumenko D., Le-Coze J., Wessel E., Fischer W., Quadackers W.J. Effect of trace amounts of carbon and nitrogen on the high temperature oxidation resistance of high purity FeCrAl alloys. *Materials Transactions*, 2002, vol. 43, no. 2, pp. 168–172.

11. Engkvist J. *Characterization of oxide scales formed on FeCrAl alloys at high temperatures*. Doctoral thesis. Göteborg, Chalmers University of Technology, 2009. 53 p. ISBN 978-91-7385-310-1
12. Engkvist J., Bexell U., Grehk M., Olsson M. High temperature oxidation of FeCrAl-alloys – influence of Al-concentration on oxide layer characteristics. *Materials and Corrosion*, 2009, vol. 60, iss. 11, pp. 876–881. doi: 10.1002/maco.200805186
13. Josefsson H., Liu F., Svensson J.-E., Halvarsson M., Johansson L.-G. Oxidation of FeCrAl alloys at 500–900 °C in dry O₂. *Materials and Corrosion*, 2005, vol. 56, iss. 1, pp. 801–805. doi: 10.1002/maco.200503882
14. Hussain T., Simms N.J., Nicholls J.R., Oakey J.E. Fireside corrosion degradation of HVOF thermal sprayed FeCrAl coating at 700–800 °C. *Surface & Coatings Technology*, 2015, vol. 268, pp. 165–172. doi: 10.1016/j.surfcoat.2015.01.074
15. Reszka K., Morgiel J., Żurek Z., Jaroń A. Characterization of alumina scale formed on FeCrAl steel. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2014, vol. 59, no. 1, pp. 73–81. doi: 10.2478/amm-2014-0013
16. Andersen O., Kostmann C., Stephani G., Korb G. Advanced porous structures made from intermetallic and superalloy fibers. *Proceedings of the 1st International Conference on Materials Processing for Properties and Performance “MP3 2002”*, Singapore, 2002, pp. 214–221
17. Antsiferov V.N., Bashkirtsev G.V. *Issledovanie protsessov formirovaniya zharostoikogo VPYaM splava khromal', kak nositelya nanodispersnogo katalizatora v klasternoi teploenergetike* [The study of the formation of heat-resistant high porous cellular alloy Fe-Cr-Al as nanosized catalyst carrier in a clustered power system]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie – Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2010, vol. 12, no. 1, pp. 7–16.
18. Bashkirtsev G.V., Khramtsov V.D. [Activation of homogenization and sintering of highly permeable cellular materials based on heat-resistant alloys by introduction of nano powders]. *Tezisy dokladov Tret'ei Vserossiiskoi konferentsii po nanomaterialam “NANO–2009”* [Proceedings of the 3rd All-Russia Conference on Nanomaterials “NANO–2009”]. Ekaterinburg, 2009, pp. 813–814. (In Russian)
19. Antsiferov V.N., Khramtsov V.D. *Sposoby polucheniya i svoistva vysokoporistyykh pronitsaemykh yacheistyykh metallov i splavov* [Methods for the preparation and properties of highly permeable cellular metals and alloys]. *Perspektivnye materialy – Journal of Advanced Materials*, 2000, no. 5, pp. 56–60. (In Russian)
20. Chepurov A.I., Sonin V.M., Chepurov A.A., Zhimulev E.I., Tolochko B.P., Eliseev V.S. *Vzaimodeistvie al'maza s ul'tradispersnym poroshkom zheleza, poluchennym razlichnymi sposobami* [Interaction of diamond with ultra-fine Fe powders prepared by different procedures]. *Neorganicheskie materialy – Inorganic Materials*, 2011, vol. 47, no. 8, pp. 957–961. (In Russian)
21. Antsiferov V.N., Gilev V.G., Kostikov V.I. *Vzaimodeistvie fullerena C₆₀ s poroshkovym zhelezom* [The interaction of the C₆₀ fullerene with powder iron]. *Perspektivnye materialy – Journal of Advanced Materials*, 1998, no. 3, pp. 5–10. (In Russian)

Article history:

Received 10 August 2015

Revised 29 April 2016

Accepted 15 May 2016