Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 11

ТВЕРЬ 2019

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2019. – Вып. 11. – 680 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2019

© Тверской государственнй университет, 2019

УДК 539.382, 53.092

Краткое сообщение

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ $Al-SiC$ И $Cu-SiC$ ПОСЛЕ ФОРМОВАНИЯ СМЕСИ ПОРОШКОВ

А.Н. Башкайкина, Н.А. Панькин, В.П. Мишкин

ФГБОУ ВО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева»

430005, Россия, Саранск, ул. Большевикская, 68

panjkinna@yandex.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.540

Аннотация: В настоящей статье приведены результаты исследования микроструктуры и плотности порошковых материалов систем $Al-SiC$ и $Cu-SiC$. Они получены холодным формованием смеси порошков меди, алюминия и карбида кремния. Предложена модель формования порошковых систем, состоящих из пластичного (металла) и хрупкого (SiC) материалов.

Ключевые слова: формование, микроструктура, порошковое тело, пористость, плотность, механистическая модель, металл, карбид кремния.

1. Введение

В настоящее время достаточно широко применяются различные композиционные материалы исходными компонентами которых являются порошки. При их изготовлении используются различные методы деформации (шликерное формование, газо- и гидростатическое сжатие и т.д.) и внешнего воздействия (вибрация, ультразвук, электрические и магнитные поля и т.д.). Разработка композита с контролируемыми свойствами при различных режимах изготовления требует знания взаимосвязи между его параметрами (например, теплопроводность, твердость и т.д.) и технологическими (например, давление прессования, температура спекания и т.д.) в достаточно широких диапазонах их варьирования. Установление данных корреляционных соотношений является актуальной прикладной задачей для последующего применения разрабатываемых материалов в реальном производстве.

Многие процессы различных технологических этапов получения композиционных материалов из порошков (особенно многокомпонентных) не имеют до настоящего времени единой теории, объясняющей их и свойства конечного продукта. Соответственно, исследование процессов, протекающих на различных стадиях производства композита, а также механизмов их протекания с объяснением формирования тех или иных его свойств, относится к актуальным (фундаментальным) задачам современного материаловедения.

Среди различных композиционных материалов широко исследуются системы (металл – SiC). Они находят применение в электротехнической промышленности при разработке электрических контактов, теплоотводящих оснований микросхем и IGBT – модулей и т.д. Среди подобных материалов широкое распространение нашел композит системы

Al-SiC [1-2]. Перспективным материалом для применения в ряде электротехнических приборов, где требуются более высокие температуры в процессе изготовления или последующей эксплуатации, является *Cu-SiC* [3-9].

Целью настоящей работы являлось исследование микроструктуры и плотности порошкового тела, полученного формованием смеси порошковых пластичного (меди или алюминия) и хрупкого (карбид кремния) материалов.

2. Методика эксперимента

В качестве исходных компонент для изготовления использовали порошки зеленого карбида кремния, алюминия и электролитической меди. Холодное формование проводили на машине для механических испытаний Shimadzu AG-X100kN при различных нагрузках/давлениях (максимальное значение – 640 МПа). После достижения предельной нагрузки проводилась выдержка в течение 5 минут при поддержании постоянными линейных размеров образца – процесс релаксации. Термическая обработка (твердофазное/жидкофазное спекание) полученных материалов не проводилась.

Содержание карбида кремния в получаемых порошковых телах не превышало 30 масс.%. При более высокой доли *SiC* происходит разрушение получаемых образцов при минимальных внешних воздействиях или при извлечении из пресс-формы.

Исследование микроструктуры поверхности образцов проводили с помощью металлографического микроскопа OLYMPUS GX-71, а их изломов и исходных материалов осуществляли на растровом электронном микроскопе Quanta 200 i 3D FEI. Плотность ρ определялась методом гидростатического взвешивания на аналитических весах XS-204.

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показаны зависимости плотности порошковых тел систем *Al-SiC* и *Cu-SiC* после стадии формования от содержания карбида кремния при различных давлениях прессования (до 640 МПа) - диаграммы прессования. Общий ход данных кривых схож для рассматриваемых систем.

Для алюминия отмечают меньшие различия в значениях плотности при фиксированном содержании карбида кремния. При этом плотность порошковых тел меньше соответствующих значений для безпористых материалов. Данный факт свидетельствует о наличии некоторого объема порового пространства. Уменьшение ρ для системы *Cu-SiC* и увеличение для *Al-SiC* с ростом содержания карбида кремния обусловлено

физическими свойствами материалов исходных компонентов. В частности, плотность меди практически в три раза больше соответствующих значений для SiC . Рост значений ρ с увеличением давления прессования обусловлен интенсификацией пластической деформации матричного материала (меди или алюминия). Данный факт способствует более полному заполнению порового пространства. При этом используемые давления не приводят к масштабному разрушению частиц карбида кремния (возможно лишь в локальных областях) и для них преобладает упругая деформация.

Рис. 1. Зависимость плотности порошковых тел от давления прессования: а – $Al-SiC$, б – $Cu-SiC$ (■ – $C(SiC)=10$ масс.%, ▲ – $C(SiC)=20$ масс.%, ● – $C(SiC)=30$ масс.%).

На наличие пор указывают исследования методами оптической (см. рис. 2) и растровой электронной микроскопии [12]. Их результаты отмечают увеличение пористости с ростом содержания карбида кремния. На изображениях РЭМ для некоторых частиц SiC отмечается наличие системы трещин, а также наличие осколков, образованных в ходе формования и приготовления излома.

Рис. 2. Микроструктура поверхности порошковых тел систем $Al-SiC$ и $Cu-SiC$. На вкладке - изображения РЭМ частиц исходных порошков.

Результаты, полученные в настоящей работе, данные предыдущих работ [6, 9, 10, 12] и механистической модели, предложенной в [11], позволяют предложить следующий (возможный) механизм формования двухкомпонентной смеси порошков, которая состоит из пластичного (меди и алюминия) и хрупкого (карбида кремния) материалов.

На начальном этапе формования (давление не превосходит предела текучести пластичного материала) происходит свободное перераспределение частиц порошков металла и карбида кремния. Приложение нагрузки приводит к разрушению исходных структурных элементов (арки, мостики и т.д.), образовавшихся при свободной засыпке в пресс-форму смеси используемых порошков [11]. При этом деформация самих частиц пренебрежимо мала. Перемещение частиц исходных

порошков и последующая их ориентация относительно других зерен являются случайными. На это указывают данные рентгенографических исследований – отсутствие преимущественной ориентации в конечном порошковом материале [12].

Дальнейший рост давления (сравнимо с пределом текучести металлического материала) приводит к увеличению межчастичного контакта – наблюдается деформация зерен матричного материала и SiC . При этом, для образцов с малым содержанием карбида кремния, непосредственный контакт между зернами SiC практически отсутствует. Большая часть их поверхности контактирует с металлом и поровым пространством. Вследствие сильного различия в механических свойствах SiC и металлом (медь, алюминий), последний испытывает деформацию в большей степени (карбид кремния обладает более высокими прочностными характеристиками). Увеличение доли карбида кремния сопровождается ростом пористости материала, что обусловлено недостаточным контактом между матричным материалом и наполнителем. Вследствие этого, при приложении внешней нагрузки, матричный материал расширяется в имеющееся поровое пространство. Его наличие также способствует частичному снятию деформаций и остаточных напряжений после прекращения действия внешней нагрузки в ходе релаксационных процессов [12].

Увеличение доли карбида кремния способствует также появлению пустот, образованных агломерацией частиц SiC . Их объем несколько больше объема порового пространства находящегося между частицами карбида кремния и медью. Наличие данных структур сопровождается уменьшением подвижности матричного материала и способствует наличию порового пространства в порошковом теле.

Для разрушения данных структур необходимо приложить давление значительно большее, чем используемое в настоящей работе (ограничение используемой установки).

При превышении давлением прессования пределов текучести и прочности для матричных материалов происходит интенсификация процесса заполнения порового пространства. Данный факт способствует уменьшению пористости порошкового тела. При этом частицы карбида кремния испытывают преимущественно упругие деформации. Возможно локальное разрушение последних с образованием в них трещин и осколков при контакте «острие – поверхность».

Приложение давлений (больше значений используемых в настоящей работе) превышающих пределы прочности как матричного, так и пластичного материалов, будет способствовать формированию образцов с максимально возможной плотностью. Формированию безпористого

образца будут мешать наличие агломерационных образований образованных продуктами разрушения частиц карбида кремния и воздушных областей сильного сжатия порового пространства. Последние максимально снимаются последующей термической обработкой – жидко- или твердофазным спеканием.

Библиографический список:

1. **Нищев, К.Н.** Исследование микроструктуры металломатричного композиционного материала *AlSiC* методом растровой электронной микроскопии / К.Н. Нищев, М.И. Новопольцев, В.П. Мишкин, Б.В. Щетанов // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2013. – Т. 77. – №8. – С. 1082-1087.
2. **Kablov, E.N.** *AlSiC*-based metal matrix composites for power electronic devices / E.N. Kablov, D.V. Grashchenkov, B.V. Shchetanov, et al. // Composites: Mechanics, Computations, Applications. –2013. – Т. 4. – Вып. 1. – С. 65-74.
3. **Prosviryakov, A.S.** *SiC* content effect on the properties of *Cu–SiC* composites produced by mechanical alloying / A.S. Prosviryakov // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – V. 632. – P. 707-710.
4. **Shabani, M.** Microstructural and sliding wear behavior of *SiC*-particle reinforced copper matrix composites fabricated by sintering and sinter-forging processes / M. Shabani, M.H. Paydar, R. Zamiri, M. Goodarzi, M.M. Moshksar // Journal of Materials Research and Technology. – 2016. – V.5. – I. 1. – P. 5-12.
5. **Singh, H.** Development of *Cu* reinforced *SiC* particulate composites / H. Singh, L. Kumar, S.N. Alam // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – V. 75. – P. 012007-1-012007-13.
6. **Панькин, Н.А.** Исследование металломатричного композиционного материала *Cu–SiC* после его термической обработки / Н.А. Панькин, А.Ф. Сигачев, А.С. Луконькина, Н.И. Чистяков // Прикладная физика. – 2018. – № 5. – С. 71-76.
7. **Chmielewski, M.** Microstructure and thermal properties of *Cu–SiC* composite materials depending on the sintering technique / M. Chmielewski, K. Pietrzak, A. Strojny-Nedza, et al. // Science of Sintering. – 2017. –V. 49. – № 1. – P. 11-22.
8. **Azreen, A.R. Fatimah** Development of *Cu–SiC* composite for electrical discharge machining electrode using powder metallurgy technique / A.R. Fatimah Azreen, A.G.E. Sutjipto, A.M. Al-Bat'hi Souad // Advanced Materials Research. –2012. – V. 576. – P. 203-207.
9. **Панькин, Н.А.** Исследование процесса холодного формования при получении композиционного материала системы *Cu–SiC* / Н.А. Панькин, А.Ф. Сигачев, А.С. Луконькина, В.П. Мишкин // Прикладная физика. – 2018. – № 4. – С. 100-105.
10. **Панькин, Н.А.** Электронная микроскопия композитов *Cu–SiC*, полученных холодным формованием и твердофазным спеканием / Н.А. Панькин, В.П. Мишкин // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2018. – Вып. 10. – С.517-523.
11. **Двилис, Э.С.** Закономерности процессов консолидации порошковых систем при изменении условий деформации и физических воздействий: дисс. ... докт. физ.-мат. наук: 01.04.07: защищена 24.12.2014: утв. 25.06.2015 / Двилис Эдгар Сергеевич. – Томск: Нац. исслед. Том. политехн. ун-т, 2014. – 386 с.

12. **Панькин, Н.А.** Рентгенографическое исследование системы «медь - карбид кремния» после прессования смеси порошков / Н.А. Панькин // Прикладная физика. – 2019. – № 3. – С. 67-79.

References:

1. **Nishchev, K.N.** Studying the microstructure of *AlSiC* metal matrix composite material by scanning electron microscopy / K.N. Nishchev, M.I. Novopoltsev, V.P. Mishkin, B.V. Shchetanov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2013. – V. 77. – I. 8. – P. 981-985.
2. **Kablov, E.N.** *AlSiC*-based metal matrix composites for power electronic devices / E.N. Kablov, D.V. Grashchenkov, B.V. Shchetanov, et al. // Composites: Mechanics, Computations, Applications. – 2013. – V. 4. – I. 1. – P. 65-74.
3. **Prosviryakov, A.S.** *SiC* content effect on the properties of *Cu–SiC* composites produced by mechanical alloying / A.S. Prosviryakov // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – V. 632. – P. 707-710.
4. **Shabani, M.** Microstructural and sliding wear behavior of *SiC*-particle reinforced copper matrix composites fabricated by sintering and sinter-forging processes / M. Shabani, M.H. Paydar, R. Zamiri, M. Goodarzi, M.M. Moshksar // Journal of Materials Research and Technology. – 2016. – V.5. – I. 1. – P. 5-12.
5. **Singh, H.** Development of *Cu* reinforced *SiC* particulate composites / H. Singh, L. Kumar, S.N. Alam // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – V. 75. – P. 012007-1-012007-13.
6. **Pan'kin, N.A.** Investigation of the metal-matrix composite *Cu–SiC* material after its heat treatment / N.A. Pan'kin, A.F. Sigachev, A.S. Lukon'kina, N.I. Chistyakov // Applied physics. – 2018. – № 5. – P. 71-76. (In Russian).
7. **Chmielewski, M.** Microstructure and thermal properties of *Cu–SiC* composite materials depending on the sintering technique / M. Chmielewski, K. Pietrzak, A. Strojny-Nedza, et al. // Science of Sintering. – 2017. – V. 49. – № 1. – P. 11-22.
8. **Azreen, A.R. Fatimah** Development of *Cu–SiC* composite for electrical discharge machining electrode using powder metallurgy technique / A.R. Fatimah Azreen, A.G.E. Sutjipto, A.M. Al-Bat'hi Souad // Advanced Materials Research. – 2012. – V. 576. – P. 203-207.
9. **Pan'kin, N.A.** Investigation of the process of cold forming of composite material of the *Cu–SiC* system / N.A. Pan'kin, A.F. Sigachev, A.S. Lukon'kina, V.P. Mishkin // Applied physics. – 2018. – № 4. – P. 100-105. (In Russian).
10. **Pan'kin, N.A.** Electron microscopy of *Cu–SiC* composites: a cold-molding and solid phase sintering / N.A. Pan'kin, V.P. Mishkin // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2018. – I. 10. – P. 517-523. (In Russian).
11. **Dvilis, E.S.** Regularities of the processes of consolidation of powder systems with changing conditions of deformation and physical effects: diss. ... dokt. fiz.-mat. nauk: 01.04.07: zashchishchena 24.12.2014; utv. 25.06.2015 / Dvilis Edgar Sergeevich. – Tomsk: Nats. issled. Tom. politekhn. un-t, 2014. – 386 s. (In Russian).
12. **Pan'kin, N.A.** X-Ray study of the «copper-silicon carbide» system after molding a mixture of powders / N.A. Pan'kin // Applied physics. – 2019. – № 3. – P. 67-79. (In Russian).

**RESEARCH OF Al - SiC AND Cu - SiC SYSTEMS AFTER FORMING OF POWDER
MIXTURE**

A.N. Bashkaykina, N.A. Pan'kin, V.P. Mishkin

National Research N.P. Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.540

Abstract: This article presents the results of a study of the microstructure and density of powder materials of the *Al - SiC* and *Cu - SiC* systems. They are obtained by cold forming a mixture of powders of copper, aluminum and silicon carbide. A model for molding powder systems consisting of plastic (metal) and brittle (*SiC*) materials is proposed.

Keywords: *molding, microstructure, powder body, porosity, density, mechanistic model, metal, silicon carbide.*

Башкайкина Анастасия Николаевна – магистрант второго года обучения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева»

Панькин Николай Александрович – к.ф.-м.н., доцент кафедры физики твердого тела ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет» им. Н.П. Огарева»

Мишкин Владимир Петрович – младший научный сотрудник, кафедра общей физики ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет»

Anastasiya N. Bashkaykina – 2nd year undergraduate student, National Research N.P. Ogarev Mordovia State University

Nikolay A. Pan'kin – Ph. D., Docent, Department of Solid State Physics, National Research N.P. Ogarev Mordovia State University

Vladimir P. Mishkin – Senior Reseacher, Department of General Physics, National Research N.P. Ogarev Mordovia State University

Поступила в редакцию/received: 03.09.2019; после рецензирования/revised: 01.10.2019; принята/accepted 10.11.2019.