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**

выпуск 12

ТВЕРЬ 2020

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 журнале «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, 2020. – Вып. 12. – 908 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 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. Журнал 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, 2020

© Тверской государственный университет, 2020

УДК 538.951, 620.173

Оригинальная статья

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАГРАММ ПРЕССОВАНИЯ ПРИ ФОРМОВАНИИ СМЕСИ ПОРОШКОВ МЕДИ И КАРБИДА КРЕМНИЯ

Н.А. Панькин, А.Ф. Сигачев, В.П. Мишкин

*ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет им. Н.П. Огарёва»*

430005, Россия, Саранск, ул. Большевикская, 68

panjkinna@yandex.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.672

Аннотация: Проведено исследование смеси порошков меди и карбида кремния после одностороннего холодного формования в закрытой пресс-форме методами: растровой электронной микроскопии, гидростатического взвешивания и анализа диаграмм прессования. Выявлены основные этапы формования, их границы и характерные процессы, происходящие на каждом из них. Установлено, что на диаграмме формования можно выделить не менее трёх областей. Показано, что их границы (по давлению) определяются механическими свойствами материалов используемых порошков и процессами перераспределения / укладки структурных элементов и их упругой/неупругой деформации.

Ключевые слова: медь, карбид кремния, диаграмма прессования, плотность, предельное давление, форма частиц, механизм формования.

1. Введение

С начала XXI века широко начали развиваться нанотехнологии - области науки и производства связанные с применением и получением наноразмерных объектов. Среди них можно назвать производство композиционных материалов с различными сочетаниями матричных и армирующих элементов. В большинстве случаев, данные элементы представлены в виде порошков различной дисперсности и строения, которые в дальнейшем подвергаются значительным внешним нагрузкам и термической обработке. Среди подобных композитов можно назвать системы «металл – неметалл» и, в частности, металломатричные композиционные материалы «Cu – SiC» [1-9]. Они являются перспективными для изделий электротехнического назначения (теплоотводящие основания микросхем и IGBT– модулей, электрические контакты силовых приборов и т.д.). В большинстве случаев для получения (Cu , SiC) – материалов используются различные методы порошковой металлургии. Одним из важных этапов можно назвать процесс формования исходной порошковой смеси. При его реализации протекают физико-механические процессы приводящих к уплотнению, деформации и измельчению/укрупнению структуры. При этом, при формовании могут образовываться структуры из частиц нанометрового размера (на это указывают, например результаты исследований [2, 5, 7]), которые могут определять эксплуатационные характеристики конечного материала

(теплопроводность, электропроводность и т.д.) или характер протекания процессов на последующих этапах получения композиционного материала. В настоящее время, для его описания применяются: дискретно-континуальная модель [10], механика структурно-неоднородных материалов [11] и компьютерное моделирование методом конечных элементов [12]. В их рамках, исследуемый материал рассматривается через некоторые усредненные характеристики без учета дискретности его строения. В последнее время, в связи с быстрым развитием возможностей вычислительной техники, широко используется компьютерное моделирование методами молекулярной или квантово-механической динамики [13]. Но объем рассчитываемого ими пространства существенно меньше характерных размеров частиц используемых порошков (несколько микрометров). Для описания процесса формования, и в частности диаграмм прессования, используются также различные аппроксимирующие уравнения [14, 15]. Их коэффициенты находятся из экспериментальных данных для образцов после их извлечения из пресс-формы. При этом в большинстве научных публикаций исследуются однокомпонентные (или приближенные к ним) системы.

Целью настоящей статьи являлось исследование процесса одностороннего холодного формования двухкомпонентной смеси порошков меди и карбида кремния. Она достигалась путем анализа диаграмм прессования и результатов, полученных методами растровой электронной микроскопии и гидростатического взвешивания.

2. Методика эксперимента

В качестве исходных материалов исследуемой системы « $Cu-SiC$ » взяты порошки: карбида кремния (зернистость М63 по ГОСТ 26327-84 [16]) и меди (ПМС-1 по ГОСТ 4960-2009 [17]). При этом доля SiC (SiC , Cu) – порошковой смеси не превышала 30 масс.%. При больших содержаниях SiC часто происходило разрушение образца при его извлечении из пресс-формы.

Одностороннее холодное прессование (при комнатной температуре) в закрытой пресс-форме проводили на машине Shimadzu AG-X100kN при скорости движения верхнего пуансона – 2 мм/мин. Максимальное давление при формовании составляло ~ 750 МПа. Оно превышает соответствующие пределы прочности и текучести для массивной меди [36], но значительно ниже чем для карбида кремния. После достижения предельного давления, проводилась выдержка при постоянных линейных размерах формируемого образца в течение 10 минут (релаксация напряженного состояния). Процесс термической обработки (спекания), в рамках данного исследования, не проводился.

Изучение микроструктуры поверхности образцов и их излома осуществляли с помощью растрового электронного микроскопа Quanta 200 i 3D FEI. Плотность образцов (при комнатной температуре) определяли методами: гидростатического взвешивания в дистиллированной воде; измерения их массы и линейных размеров. Массу измеряли на аналитических весах XS-204.

3. Результаты и их обсуждение

Зависимости плотности ρ скомпактированного материала $\text{Cu}-\text{SiC}$ (в процессе формования и после его извлечения из пресс-формы) от давления прессования p представлены на рис. 1 – диаграммы прессования. Можно отметить, что плотность извлеченного образца несколько меньше массивного материала и находящегося в пресс-форме при аналогичном p . Данная разница определяется давлением формования и содержанием карбида кремния в исходной смеси. В частности увеличение p и снижение доли SiC сопровождается её уменьшением. Основными факторами появления разницы плотностей можно назвать сложную форму частиц используемых порошков, их размер и высокие механические свойства карбида кремния (превышают возможности используемой установки).

Рис. 1. Диаграммы прессования смеси порошков меди и карбида кремния: а – 10 масс.% SiC ; б – 30 масс.% SiC ■ – после извлечения; до извлечения: 1 – исходная диаграмма, 2 – вклад укладки/перераспределения структурных элементов, 3 – деформационный вклад).

Для объяснения экспериментальных данных воспользуемся моделью формования порошковых материалов предложенную авторами работы [14]. Согласно ей плотность ρ смеси порошков в каждый момент процесса формования представляется суперпозицией взаимного перераспределения/укладки структурных элементов образованных

частицами меди и карбида кремния ρ_{pack} и их упругой/неупругой деформации ρ_{def} : $\rho = \rho_{pack} + \rho_{def}$. При этом вклад ρ_{def} пропорционален давлению прессования p [14]. Он равен плотности безпористого образца ρ_0 при предельном давлении формования p_0 . Значение p_0 находится путем продления аппроксимирующей экспериментальные данные функции (логарифмическая, гиперболическая или степенная) до значения плотности равной ρ_0 . При этом процесс формования смеси порошков меди и карбида кремния можно считать квазистатическим. Это связано с тем, что скорость прессования много меньше скоростей распространения упругих волн в используемых материалах.

На рис. 1 приведены результаты разделения вкладов ρ_{pack} и ρ_{def} на исходной диаграмме формования. При их построении использовались значения предельных давлений прессования p_0 рассчитанных с применением логарифмической функции [14]. Как правило, для нахождения эмпирических коэффициентов последней используются экспериментальные данные для образцов извлеченных из пресс-формы. В нашем случае, применение логарифмической функции для зависимости « $\rho - p$ », полученных для образцов до их извлечения из закрытой пресс-формы, не позволяет полностью её описать во всем исследуемом диапазоне давлений (до 750 МПа). Наилучшим образом это получается сделать лишь для области более 300 МПа (линейные зависимости в координатах $\rho - \ln p$).

Анализ данных рис. 1 позволяет выделить несколько характерных областей (по прикладываемому давлению) на диаграмме прессования.

Начальный этап формования (p принимает значения до 50 МПа) характеризуется скачкообразным перераспределением и разрушением структурных элементов образованных частицами используемых порошков при пренебрежимо малой деформации материала. Их перемещение и последующая их взаимная ориентация являются хаотическими. При этом ширина данной области не зависит от состава формируемой системы. Для верхней границы данного участка, для рассматриваемых содержаний SiC , пористость образцов близка к 50 %, что, согласно [10], соответствует (в случае однокомпонентных материалов) началу уплотнения через пластическую деформацию частиц порошка. В нашем случае, первой области принадлежит предел текучести отожженной меди (30–50 МПа) [18].

Следующему этапу прессования соответствует интервал давлений от 50 МПа до $\sim 0,45p_0$. Для него выполняется неравенство $\rho_{pack} \geq \rho_{def}$. Для него характерно возникновение локальной пластической деформации материала

При давлениях прессования выше $0,45p_0$ вклад $\rho_{pack} < \rho_{def}$. При этом, координационное число первичных структурных элементов порошкового тела достигает своей предельной величины [14]. В данной области давлений прессования наблюдается плавное разрушение структур образованных частицами SiC . При этом отмечается достаточно гладкий ход кривой интенсивности уплотнения и близость к нулю второй

производной. Это возможно связано с амортизирующим действием меди. Вследствие этого частицы SiC плавно скользят друг относительно друга с уплотнением материала находящегося между ними. При этом, для образцов с малым содержанием в них карбида кремния, взаимный контакт между зернами SiC практически отсутствует. Большая часть их поверхности контактирует с металлом и поровым пространством. На это также указывают данные растровой электронной микроскопии (см. рис. 2).

Окончанию данного этапа и процесса формования соответствует предельное давление прессования p_0 , при котором плотность будет соответствовать беспористому образцу ρ_0 . В нашем случае данный предел недостижим. Причинами этого являются ограничения используемого экспериментального оборудования и особенности метода прессования [10, 11].

Заключение

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Плотность спрессованного материала после его извлечения из пресс-формы меньше значений для беспористого и материала, находящегося в пресс-форме. Вышеуказанные различия обусловлены: сложной формой частиц используемых порошков (дентритная – у медного; осколочная – у карбида кремния), их исходные большие размеры, наличием агломерационных структур, высокими механическими свойствами карбида кремния и упругим последствием.

2. Выделяется три области (по давлению прессования): 1) до 50 МПа; 2) от 50 МПа до $\sim 0,45p_0$ (p_0 – предельное давление); 3) выше $0,45p_0$. Их границы определяются механическими свойствами материалов используемых порошков и преобладающими процессами (взаимное перераспределение/укладка структурных элементов и их упругая/неупругая деформация, а также материала исходных порошков), происходящими на каждом из них.

Полученные результаты для системы «медь – карбид кремния» могут быть использованы при отработке технологии получения композиционных материалов для последующего их использования в изделиях электротехнического назначения.

Библиографический список:

1. **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. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.01.298.
2. **Akbarpour, M.R.** Hardness, wear and friction characteristics of nanostructured $Cu-SiC$ nanocomposites fabricated by powder metallurgy route / M.R. Akbarpour, M. Najafi,

- S. Alipour, H.S. Kim // Materials Today Communications. – 2019. – V. 18. – P. 25-31. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2018.11.001.
3. **Romankov, S.** Fabrication of *Cu–SiC* surface composite under ball collisions / S. Romankov, Y. Hayasaka, I.V. Shchetinin, J.-M. Yoon, S.V. Komarov // Applied surface science. – 2011. – V. 257. – I. 11. – P. 5032-5036. DOI: 10.1016/j.apsusc.2011.01.017.
4. **Башкайкина, А.Н.** Исследование систем *Al–SiC* и *Cu–SiC* после формования смеси порошков / А.Н. Башкайкина, Н.А. Панькин, В.П. Мишкин // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2019. – Вып. 11. – С. 540-547. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.540.
5. **Rado, C.** The role of compound formation in reactive wetting: the *Cu/SiC* system / C. Rado, B. Drevet, N. Eustathopoulos // Acta materialia. – 2000. – V. 48. – I. 18-19. – P. 4483-4491. DOI: 10.1016/S1359-6454(00)00235-4.
6. **Панькин, Н.А.** Рентгенографическое исследование системы «медь - карбид кремния» после прессования смеси порошков / Н.А. Панькин // Прикладная физика. – 2019. – № 3. – С. 67-74.
7. **Akbarpour, M.R.** Effect of nanoparticle content on the microstructural and mechanical properties of nano-*SiC* dispersed bulk ultrafine-grained *Cu* matrix composites / M.R. Akbarpour, E. Salahi, F.A. Hesari, H.S. Kim, A. Simchi // Materials & Design (1980-2015). – 2013. – V. 52. – P. 881-887. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.05.072.
8. **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.
9. **Moustafa, S.F.** Copper matrix *SiC* and *Al₂O₃* particulate composites by powder metallurgy technique. / S.F. Moustafa, Z. Abdel-Hamid, A.M. Abd-Elhay // Materials Letters. – 2002. V. 53. – I. 4-5. – P. 244-249. DOI: 10.1016/S0167-577X(01)00485-2.
10. **Штерн, М.Б.** Феноменологические теории прессования порошков / М.Б. Штерн. – Киев: Наукова думка, 1982. – 140 с.
11. **Панин, В.Е.** Структурные уровни пластической деформации и разрушения / В.Е. Панин, Ю.В. Гриняев, В.И. Данилов и др.; отв. ред. В.Е. Панин. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1990. – 255 с.
12. **Фук, Д.В.** Моделирование и исследование процесса уплотнения порошковых материалов с использованием программного пакета ABAQUS / Д.В. Фук, С.В. Ганин, В.Н. Цеменко // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2016. – № 1 (238). – С. 100-110. DOI 10.5862/JEST.238.10.
13. **Ибрагимов, И.М.** Основы компьютерного моделирования наносистем / И.М. Ибрагимов, А.Н. Ковшов, Ю.Ф. Назаров. – СПб.: Лань, 2010. – 384 с.
14. **Хасанов, О.Л.** Методы компактирования и консолидации наноструктурных материалов и изделий / О.Л. Хасанов, Э.С. Двилис, З.Г. Бикбаева, А.А. Качаев, В.В. Полисадова. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2013. – 269 с.
15. **Константинова, Т.Е.** Эффекты влияния высоких давлений в наноразмерных порошковых системах на основе диоксида циркония / Т.Е. Константинова, И.А. Даниленко, О.А. Горбань // Физика и техника высоких давлений. – 2014. – Т. 24. – № 2. – С. 67-85.
16. Материалы шлифовальные из карбида кремния. Технические условия: ГОСТ 26327-84. – Введ. впервые 01.01.1986.
17. Порошок медный электролитический. Технические условия: ГОСТ 4960-2017. – Взамен ГОСТ 4960-2009; введ. 01.07.2018.
18. **Бобылев, А.В.** Механические и технологические свойства металлов: справочник /

А.В. Бобылев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1987. – 205 с.

References:

1. **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. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.01.298.
2. **Akbarpour, M.R.** Hardness, wear and friction characteristics of nanostructured *Cu–SiC* nanocomposites fabricated by powder metallurgy route / M.R. Akbarpour, M. Najafi, S. Alipour, H.S. Kim // *Materials Today Communications*. – 2019. – V. 18. – P. 25-31. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2018.11.001.
3. **Romankov, S.** Fabrication of *Cu–SiC* surface composite under ball collisions / S. Romankov, Y. Hayasaka, I.V. Shchetinin, J.-M. Yoon, S.V. Komarov // *Applied surface science*. – 2011. – V. 257. – I. 11. – P. 5032-5036. DOI: 10.1016/j.apsusc.2011.01.017.
4. **Bashkaykina, A.N.** Issledovanie sistem *Al–SiC* i *Cu–SiC* posle formovaniya smesi poroshkov [Research of *Al–SiC* and *Cu–SiC* systems after forming of powder mixture] / A.N. Bashkaykina, N.A. Pan'kin, V.P. Mishkin // *Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*. – 2019. – I. 11. – P. 540-547. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.540. (In Russian).
5. **Rado, C.** The role of compound formation in reactive wetting: the *Cu/SiC* system / C. Rado, B. Drevet, N. Eustathopoulos // *Acta materialia*. – 2000. – V. 48. – I. 18-19. – P. 4483-4491. DOI: 10.1016/S1359-6454(00)00235-4.
6. **Pan'kin, N.A.** Rentgenograficheskoe issledovanie sistemy «med' - karbid kremniya» posle pressovaniya smesi poroshkov [X-Ray study of the «copper-silicon carbide» system after molding a mixture of powders] / N.A. Pan'kin // *Prikladnaya fizika*. – 2019. – № 3. – P. 67-74. (In Russian).
7. **Akbarpour, M.R.** Effect of nanoparticle content on the microstructural and mechanical properties of nano-*SiC* dispersed bulk ultrafine-grained *Cu* matrix composites / M.R. Akbarpour, E. Salahi, F.A. Hesari, H.S. Kim, A. Simchi // *Materials & Design* (1980-2015). – 2013. – V. 52. – P. 881-887. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.05.072.
8. **Pankin, N.A.** Issledovanie protsessa kholodnogo formovaniya pri poluchenii kompozitsionnogo materiala sistemy *Cu–SiC* [Investigation of the process of cold forming of composite material of the *Cu–SiC* system] / N.A. Pankin, A.F. Sigachev, A.S. Lukonkina, V.P. Mishkin // *Prikladnaya fizika*. – 2018. – № 4. – P. 100-105. (In Russian).
9. **Moustafa, S.F.** Copper matrix *SiC* and *Al₂O₃* particulate composites by powder metallurgy technique. / S.F. Moustafa, Z. Abdel-Hamid, A.M. Abd-Elhay // *Materials Letters*. – 2002. V. 53. – I. 4-5. – P. 244-249. DOI: 10.1016/S0167-577X(01)00485-2.
10. **Shtern, M.B.** Fenomenologicheskie teorii pressovaniya poroshkov [Phenomenological theories of powder pressing] / M.B. Shtern. – Kiev: Naukova dumka, 1982. – 140 p. (In Russian).
11. **Panin, V.E.** Strukturnye urovni plasticheskoi deformatsii i razrusheniya [Structural levels of plastic deformation and fracture] / V.E. Panin, Yu.V. Grinyaev, V.I. Danilov i dr.; otv. red. V.E. Panin. – Novosibirsk: Nauka. Sibirskoe otdelenie, 1990. – 255 p. (In Russian).
12. **Fuk, D.V.** Modelirovanie i issledovanie protsessa uplotneniya poroshkovykh materialov s ispol'zovaniem programmnoho paketa ABAQUS [Study of the consolidation of powder materials using the ABAQUS software package] / D.V. Fuk, S.V. Ganin, V.N. Tsemenko // *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Sciences And Technology*. – 2016. – № 1 (238). – P. 100-110. DOI 10.5862/JEST.238.10. (In Russian).

13. **Ibragimov, I.M.** Osnovy komp'yuternogo modelirovaniya nanosistem [Fundamentals of computer modeling of nanosystems] / I.M. Ibragimov, A.N. Kovshov, Yu.F. Nazarov. – SPb.: Lan', 2010. – 384 p. (In Russian).
14. **Khasanov, O.L.** Metody kompaktirovaniya i konsolidatsii nanostrukturnykh materialov i izdelii [Methods for compacting and consolidating nanostructured materials and products] / O.L. Khasanov, Eh.S. Dvilis, Z.G. Bikbaeva, A.A. Kachaev, V.V. Polisadova. – M.: Binom. Laboratoriya znaniy, 2013. – 269 p. (In Russian).
15. **Konstantinova, T.E.** Ehfekty vliyaniya vysokikh davlenii v nanorazmernykh poroshkovykh sistemakh na osnove dioksida tsirkoniya [High pressure effect on nano-sized zirconia-based powder systems] / T.E. Konstantinova, I.A. Danilenko, O.A. Gorban // Physics and high pressure technology. – 2014. – V. 24. – № 2. – P. 67-85. (In Russian).
16. Materialy shlifoval'nye iz karbida kremniya. Tekhnicheskie usloviya [Grinding materials from silicon carbide. Specifications]: GOST 26327-84. – Vved. v pervye 01.01.1986. (In Russian).
17. Poroshok mednyi ehlektroliticheskii. Tekhnicheskie usloviya [Electrolytic copper powder. Specifications]: GOST 4960-2017. – Vzamen GOST 4960-2009; vved. 01.07.2018. (In Russian).
18. **Bobylev, A.V.** Mekhanicheskie i tekhnologicheskie svoistva metallov: spravochnik [Mechanical and technological properties of metals: a reference book] / A.V. Bobylev. – 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Metallurgiya, 1987. – 205 p. (In Russian).

Original paper

INVESTIGATION OF PRESSING DIAGRAMS DURING MOLDING A MIXTURE OF COPPER POWDERS AND SILICON CARBIDE

N.A. Pan'kin, A.F. Sigachev, V.P. Mishkin
Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.672

Abstract: A study of a mixture of copper and silicon carbide powders after one-sided cold forming in a closed mold was carried out by the next methods: scanning electron microscopy, hydrostatic weighing and analysis of pressing diagrams. The main stages of molding, their boundaries and characteristic processes occurring at each of them are identified. It was found that at least three areas can be distinguished in the molding diagram. It is shown that their boundaries (in terms of pressure) are determined by the mechanical properties of the materials of the used powders and the processes of redistribution / packing of structural elements and their elastic / inelastic deformation.

Keywords: *copper, silicon carbide, pressing diagram, density, ultimate pressure, particle shape, forming mechanism.*

Панькин Николай Александрович – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры физики твердого тела ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва»
Сизачев Александр Федорович – ведущий инженер кафедры физики твердого тела ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва»
Мишкин Владимир Петрович – младший научный сотрудник кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва»

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

Alexander F. Sigachev – Leading Engineer, Department of Solid State Physics, National Research N.P. Ogarev Mordovia State University

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

Поступила в редакцию/received: 25.08.2020; после рецензирования/revised: 21.09.2020; принята/accepted 02.10.2020.