

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 004.042:53.097

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.04.011

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ОБРАЗОВАНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ СТРУКТУР ПРИ ПРОТЕКАНИИ ТОКА ЧЕРЕЗ ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

**Игорь Николаевич Сачков¹, Ольга Михайловна Огородникова^{2†},
Илья Игоревич Огородников³**

^{1,2} Уральский федеральный университет, ул. Мира, 19, 620002, Екатеринбург, Россия

³ Институт химии твердого тела УрО РАН, ул. Первомайская, 91, 620990, Екатеринбург, Россия

¹ I.N.Sachkov@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2265-5860>

² Olga.Ogorodnikova@urfu.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-0604-670X>

³ I_Ogorodnikov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0986-8805>

Аннотация. Компьютерное моделирование новых методов обработки материалов носит междисциплинарный характер и требует развития специального программного обеспечения с соответствующими математическими моделями и алгоритмами. В данной работе создана программа для конечно-элементного моделирования явлений, связанных с выделением Джоулева тепла в неоднородных системах. С использованием созданной программы исследована модельная система, имитирующая протекание электрического тока через полидисперсный порошковый материал. Модельный материал имеет матричную структуру, образован круглыми в сечении включениями и характеризуется различной проводимостью, концентрацией и взаимным расположением частиц. Показана возможность получения анизотропной структуры в результате теплового воздействия на порошковый материал при протекании электрического тока. Установлен перечень управляющих параметров технологического процесса для получения анизотропного порошкового материала. Предложен метод систематизации результатов компьютерного моделирования с использованием диаграмм, подобных фазовым диаграммам многокомпонентных соединений.

Ключевые слова: порошковые материалы, спекание, анизотропия, компьютерное моделирование, метод конечных элементов, Джоулево тепло.

Благодарности: Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 23-29-00411 по приоритетному направлению деятельности «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами».

Для цитирования: Сачков И.Н., Огородникова О.М., Огородников И.И. Компьютерное моделирование эффектов образования анизотропных структур при протекании тока через порошковые материалы // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2024. Т. 21, № 4. С. 502–508. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.04.011.

Original article

COMPUTER SIMULATION OF THE FORMATION OF ANISOTROPIC STRUCTURES IN POWDER MATERIALS UNDER THE INFLUENCE OF ELECTRIC CURRENT

Igor N. Sachkov¹, Olga M. Ogorodnikova^{2†}, Ilya I. Ogorodnikov³

^{1,2} Ural Federal University, Mira St., 19, Ekaterinburg, 620002, Russia

³ Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Pervomaiskaya St., 91, Ekaterinburg, 620990, Russia

¹ I.N.Sachkov@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2265-5860>

² Olga.Ogorodnikova@urfu.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-0604-670X>

³ I_Ogorodnikov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0986-8805>

Abstract. Computer simulation of new methods for material processing is a multidisciplinary analysis and requires the development of special software with appropriate mathematical models and algorithms. In this paper, a program for finite element modeling of phenomena associated with the release of Joule heat in inhomogeneous systems is created. Using the developed program, a model system simulating a polydisperse powder material was investigated. In the model, an electric current flows through the powder material. The model material has a matrix structure with round-section particles. The parametric model is characterized by different conductivity, concentration, and mutual arrangement of particles. The possibility of obtaining an anisotropic structure as a result of thermal action on the powder material during the flow of electric current was shown. A list of control parameters of the technological process for obtaining anisotropic powder material was established. A method for system analysis of computer simulation results using diagrams similar to phase diagrams of multicomponent compounds was proposed.

Keywords: powder materials, sintering, anisotropy, computer simulation, finite element method, Joule heat.

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-29-00411 in the priority area of activity «Conducting fundamental scientific research and exploratory scientific research by small individual scientific groups».

For citation: Sachkov, I. N., Ogorodnikova, O. M. & Ogorodnikov, I. I. (2024). Computer simulation of the formation of anisotropic structures in powder materials under the influence of electric current. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 21(4), 502–508. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.04.011.

Введение

Компьютерное моделирование новых технологических процессов обработки материалов является актуальным направлением цифровизации производства и зачастую не может быть выполнено с использованием универсального программного обеспечения, разработанного для расчетного обоснования конструкционной прочности [1]. В моделировании технологических процессов необходимо учесть параметры, нехарактерные для режимов эксплуатации конструкций, которые учитывают запредельное напряжение, нелинейное поведение материалов в условиях фазового перехода и повышенных температур, изменение свойств в зависимости от микроструктуры и плотности дефектов [2]. Компьютерное моделирование материалов с применением методов молекулярной динамики также имеет ограничения, связанные с наноразмерным уровнем анализируемых объектов [3].

Большой интерес представляет компьютерное моделирование материалов под воздействием электрического тока [4] как методологическая основа для исследования и разработки технологий синтеза порошковых материалов, например, спекания с помощью импульсов электрического тока [5]. Вместе с тем, недостаточно исследованными остаются эффекты, связанные с выделением Джоулева тепла в многофазных материалах и формированием анизотропной структуры при спекании, что ограничивает возможность прогнозирования повышенных свойств на этапе выбора оптимальных технологических режимов.

Электроимпульсное спекание применяется для формирования покрытий и заготовок в порошковой металлургии [6], в частности, для изготовления электрических контактов из композиционных материалов [7]. Технологические процессы изготовления контактов методами порошковой металлургии включают смешивание исходных компонентов, их прессовку и дальнейшее спекание [8]. При этом синтезируется двухфазная структура, в которой один компонент обладает высокой электрической проводимостью и теплопроводностью, второй компонент обеспечивает высокие прочностные свойства изделия. Например, активно исследуются в последнее время композиты на основе смеси меди и вольфрама [9], применяемые в электротехнике и атомной энергетике.

Следует отметить, что оптимальные эксплуатационные характеристики изделия из порошкового материала обеспечиваются путем тщательного выбора целого ряда технологических параметров, которые определяют разmol порошков, выделение нужной фракции, выбор концентрации компонентов и режимов смешивания, прессовку, отжиг, термообработку. Таким образом, разработка технологии синтеза композита методами порошковой металлургии требует последовательного варьирования большой совокупности управляющих параметров. При этом изменение одного из управляющих параметров влечет необходимость изменения ряда других. Процесс создания нового материала занимает, как правило, несколько лет и требует нескольких тысяч пробных синтезов. Компьютерное моделирование позволяет частично заменить натурные испытания вычисли-

тельными экспериментами и сократить сроки разработки новых порошковых материалов.

В данной работе была поставлена цель использовать конечно-элементное моделирование для многодисциплинарного анализа тепловых и структурных эффектов в порошковых материалах при протекании электрического тока на стадии технологической обработки.

Материалы и методы исследования

Порошковые материалы, получаемые традиционными методами высокотемпературного спекания, характеризуются однородной структурой и анизотропией свойств. В данной работе рассмотрены двухкомпонентные материалы для электрических контактов, подобные композитам на основе W–Cu [10], в которых вольфрам обеспечивает необходимую механическую прочность и стойкость к образованию электрической дуги, а за счет меди достигается высокий уровень электро- и теплопроводности. Рассмотренные материалы отличаются значительной разницей в значениях электрической проводимости компонентов, образующих двухфазную смесь. Для того, чтобы обеспечить функциональное предназначение порошкового электроконтактного материала, необходимо при спекании исключить образование пор и обеспечить седиментацию проводящих частиц.

Модельный материал подвергнут компьютерному моделированию с учетом отличительных особенностей технологического процесса. В частности, учтен существенно неравномерный характер выделения тепла при использовании технологий спекания порошковых материалов методом пропускания электрического тока.

Процесс спекания исследован в вычислительных экспериментах с использованием авторского программного обеспечения [11], которое состоит из головной подпрограммы и 9 подпрограмм. Программа содержит около 800 строк, написанных на языке Фортран, и реализует дискретное решение уравнений математической модели методом конечных элементов. Головная программа осуществляет ввод/вывод данных и организует циклы, имитирующие протекание процесса во времени. Подпрограммы последовательно выполняют следующие действия: генерация исходной сетки равномерных разбиений с использованием симплекс-элементов; коррекция координат узлов в соответствии с расположением произвольного числа круглых включений и присвоение конечным элементам соответствующих значений прово-

димости; вычисление на сетке эффективной проводимости, совокупности градиентов потенциала и плотностей тепловыделений; формирование цифрового массива расчетных данных для визуализации результатов вычислительного эксперимента.

Компьютерная модель процессов спекания

Компьютерная модель формируется для анализа тепловых эффектов, связанных с подгревом цилиндрической заготовки из порошкового материала электрическим током. Сила тока варьируется и может быть одним из управляющих параметров технологического процесса при синтезе композиционного материала.

Геометрическая модель представляет регулярную структуру псевдосплава, в которой тугоплавкие круглые включения расположены на расстоянии d друг от друга в легкоплавкой матрице (рис.1).

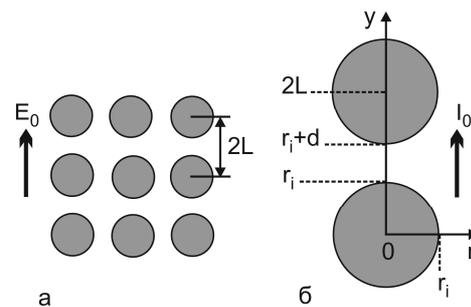


Рис.1. Сечение регулярной двухфазной структуры композита (а) и расчетной области в цилиндрической системе координат (б)

Fig.1. Section of a regular two-phase structure of a composite (a) and the computational domain in a cylindrical coordinate system (b)

Физическая модель ограничивается решением стационарной задачи в цилиндрической системе координат и сводится к рассмотрению плоского сечения. Стрелкой на рис.1а показан вектор напряженности невозмущенного электрического поля E_0 . Можно вычислить распределение электрического потенциала $\varphi(r,y)$ в присутствии включений с использованием вариационной формулировки уравнений переноса и с учетом условия экстремальности функционала:

$$\chi = \int_V \sigma(\text{grad } \varphi)^2 dV,$$

где φ – электрический потенциал, σ – локальная проводимость, V – объем расчетной области; функционал χ имеет смысл произведения эн-

тропии, при этом множители ($\text{grad } \varphi$) и ($\sigma \text{ grad } \varphi$) играют роль термодинамической силы и термодинамического потока соответственно.

Компьютерная модель процесса спекания включает конечно-элементную сетку с учетом составленной геометрической модели и использована для нахождения пространственного распределения электрического потенциала с учетом рассмотренной физической модели. Для построения сетки выполнена триангуляция расчетной области с общим количеством элементов 100×100 .

Анализ результатов вычислительных экспериментов

В вычислительных экспериментах были получены варианты пространственного распределения мощности выделяемого Джоулева тепла $P(r, y)$ и эффективной проводимости σ_{ef} при протекании электрического тока через модельный двухфазный материал. Варьировались значения проводимости, концентрации и взаимного расположения включений. Расчеты выполнялись для двух и более частиц в модели.

Введем безразмерную величину $p = P/P_0$, которая показывает отношение локальной мощности P к ее среднему значению по образцу P_0 , и позволяет графически отобразить неоднородное распределение тепловыделения. Если задать в расчетах разность потенциалов равной единице, то $P_0 = \sigma_{ef}$. Введем также безразмерную величину $\Delta = d/L$, которая характеризует относительное расстояние между включениями в матрице.

Результаты одного из вычислительных экспериментов представлены графиками на рис.2. Анализ графиков подтверждает, что в модельном материале выделение Джоулева тепла происходит неравномерно (рис.2). Тепловыделение концентрируется в пространстве между включениями, где по мощности на порядок превышает среднее значение по образцу. Для представленных графиков в расчете задана проводимость включений, превышающая в 10 раз проводимость матрицы: $\sigma_i = 10$. Относительное расстояние между частицами Δ для графиков 1 и 2 равно 0,4 и 0,1 соответственно. Эффект тепловыделения усиливается при сокращении расстояния между включениями.

Максимальное тепловыделение происходит в точках с координатами (рис.1б): $r = 0$ (радиальная координата), $y = r_i$ и $y = r_i + d$ (осевые координаты). Следует отметить, что концентрация тепловыделения наблюдается в осевом

направлении и не происходит в радиальном направлении. Таким образом, неравномерность тепловыделения характеризуется ярко выраженной направленностью, осевой анизотропией.

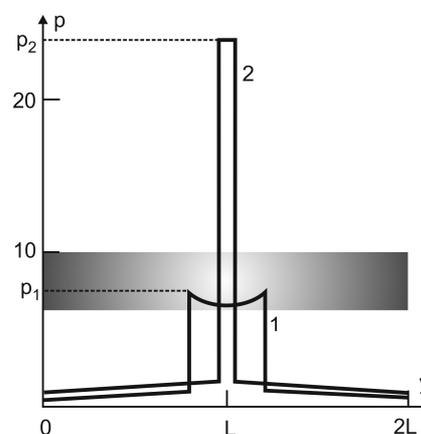


Рис.2. Графики распределения мощности выделения Джоулева тепла при расстоянии между включениями $\Delta = 0,4$ (1) и $\Delta = 0,1$ (2) в относительных единицах

Fig.2. Graphs of the distribution of the Joule heat release power at a distance between inclusions of $\Delta = 0.4$ (1) and $\Delta = 0.1$ (2) in relative units

Можно ожидать, что параметр p , характеризующий мощность выделения Джоулева тепла, влияет на качество материала, получаемого методами порошковой металлургии. Недостаточное тепловыделение замедляет седиментацию, чрезмерное приводит к окислению. Например, на рис.2 полосой выделен интервал оптимальных значений параметра p от 7 до 10 для исследованной системы.

Анализ результатов вычислительных экспериментов показывает, что параметр p зависит от расстояния между частицами и от соотношения проводимостей матрицы и включений. Необходимо учитывать, что относительное расстояние между частицами уменьшается при увеличении концентрации проводящей фазы. Графики на рис.3 иллюстрируют неоднородное тепловыделение по направлению оси y в зависимости от относительного расстояния Δ между частицами и отношения проводимости включений к проводимости матрицы σ_i/σ_m . Значение $\Delta = 0$ соответствует касанию частиц, отрицательные значения Δ означают пересечение частиц по направлению оси y в результате седиментации.

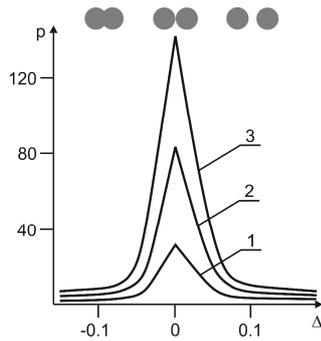


Рис.3. Зависимость мощности выделения Джоулева тепла от расстояния между включениями в относительных единицах при значениях параметра проводимости σ_i/σ_m , равном 5 (1), 10 (2) и 15 (3)

Fig.3. Dependence of the Joule heat release power on the distance between inclusions in relative units for conductivity parameter values σ_i/σ_m equal to 5 (1), 10 (2) and 15 (3)

Таким образом, эффект локального тепловыделения в узкой области между частицами усиливается, когда увеличивается их концентрация вдоль вектора напряженности невозмущенного электрического поля и относительная проводимость в сравнении с проводимостью матрицы. В соответствии с результатами компьютерного моделирования значительное выделение Джоулева тепла ожидается в узкой зоне шириной 5 % от радиуса включений.

Обсуждение возможности возникновения анизотропных волокнистых структур в порошковых материалах

Интенсивный характер локального тепловыделения, выявленный в результате компьютерного моделирования процессов спекания порошкового материала, позволяет предположить, что существенный локальный перегрев может ускорить седиментацию и соединение частиц высокопроводящей фазы композитного материала. В таком случае соединенные частицы сформируют в составе двухфазной структуры вытянутые включения с преимущественной ориентацией вдоль вектора напряженности невозмущенного электрического поля. Степень возникшей анизотропии можно характеризовать параметром порядка, который варьируется в интервале $0 \leq \eta \leq 1$ и отражает вероятность соединения двух частиц.

На рис.4 изображены схемы соединения частиц высокопроводящей фазы и образования неоднородной структуры порошкового материала в зависимости от параметра порядка.

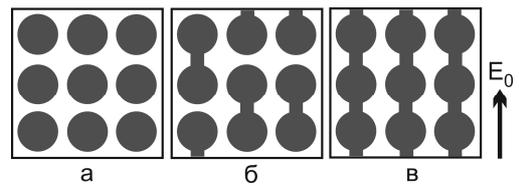


Рис.4. Схемы соединения частиц при седиментации и образование анизотропной двухфазной структуры с параметром порядка 0 (а), 0,5 (б), 1 (в)

Fig.4. Schemes of particle connection during sedimentation and formation of an anisotropic two-phase structure with an order parameter of 0 (a), 0.5 (b), 1 (c)

Исходная структура, в которой частицы не подверглись седиментации, обладает пространственной изотропией свойств с параметром порядка $\eta = 0$. В идеально анизотропной структуре с параметром порядка $\eta = 1$ произошло соединение всех частиц в осевом направлении образца. В такой структуре образуются условия для получения максимальной степени анизотропии электрических и механических свойств композита. В структуре с параметром порядка $\eta = 0,5$ образуются дипольные включения высокопроводящих частиц, ось которых сонаправлена с вектором напряженности E_0 .

На рис.5 показаны зависимости анизотропии электрической проводимости композита от параметра порядка. В качестве характеристики анизотропии выбрано отношение значений проводимости вдоль оси σ_y и в радиальном направлении σ_r .

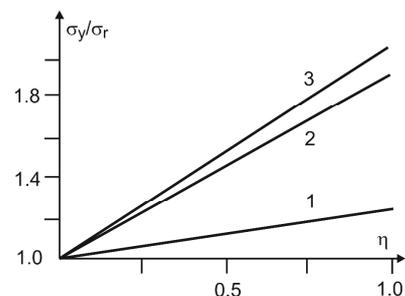


Рис.5. Зависимости анизотропии проводимости композита от параметра порядка в относительных единицах при отношении проводимости включений к проводимости матрицы σ_i/σ_m , равном 5 (1), 10 (2) и 15 (3)

Fig.5. Dependences of the anisotropy of the conductivity of the composite on the order parameter in relative units with the ratio of the conductivity of the inclusions to the conductivity of the matrix σ_i/σ_m equal to 5 (1), 10 (2) and 15 (3)

Следует отметить, что в реальной системе распределение частиц в матрице носит статистический характер, но существуют благоприятные

ятные условия для образования кластеров соединенных частиц в осевом направлении. Возникновение кластера усиливает локальное тепловыделение, что инициирует присоединение новых частиц. Таким образом, в системе возникает положительная обратная связь, которая способствует дальнейшему росту параметра порядка.

Конечно-элементный анализ позволяет выделить управляющие параметры процесса спекания и вычислить их оптимальные значения для получения желаемой структуры с заданными свойствами. Как показывает компьютерное моделирование, важным управляющим параметром синтеза двухфазного композита, помимо силы подогревающего тока, является концентрация Si компоненты с более высокой электропроводностью. С увеличением концентрации проводящих частиц снижается среднее расстояние между ними и повышается локальное выделение Джоулева тепла, что создает благоприятные условия для образования и роста кластеров частиц в направлении, совпадающем с направлением электрического тока.

Заключение

С использованием авторской программы выполнено конечно-элементное моделирование процессов спекания порошкового материала в условиях неоднородного выделения Джоулева тепла. Основные выводы по результатам вычислительных экспериментов заключаются в следующем:

1. При разработке технологий спекания порошковых материалов методом пропускания электрического тока необходимо учитывать существенную неравномерность выделения Джоулева тепла.

2. Обсуждаемый эффект концентрации тепловыделений в процессах синтеза порошковых материалов методом пропускания электрического тока может иметь технологическое применение для создания анизотропии свойств типа «выделенная ось».

3. Анонсируемые в настоящей статье компьютерные программы на основе МКЭ могут применяться для контроля процессов спекания материала методом порошковой металлургии с подогревом электрическим током.

Список литературы

1. Огородникова О.М. О проблемах интеграции вычислительного материаловедения в цифровое машиностроение // Информационные

технологии в проектировании и производстве. 2014. № 2. С. 30–34.

2. Огородникова О.М. Напряженно-деформированное состояние металла в эффективном интервале кристаллизации // Литейное производство. 2012. № 9. С. 21–24.

3. Иордан В.И., Шмаков И.А. Структурно-фазовые превращения в гетерогенных структурах алюминидов никеля и титана в процессе их синтеза: молекулярно-динамическое исследование фазообразования // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 3. С. 289–298.

4. Сачков И.Н., Огородникова О.М., Огородников И.И. Деградация контактных материалов на основе Pd–Cu при протекании электрического тока // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2024. Т. 21, № 3. С. 337–344.

5. Масанский О.А., Токмин А.Г., Анисимов А.Г., Масанский С.О. Получение алюмоматричных композитных материалов по технологии электроимпульсного спекания // Известия Алтайского государственного университета. 2024. № 1. С. 37–42.

6. Григорьев Е.Г., Стрижаков Е.Л., Савич В.В., Кузнечик О.О. Перспективы развития электроимпульсного спекания как феномена высоковольтной консолидации порошковых материалов // В сб. докладов 13 Международного симпозиума «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка». 5–7 апреля 2023. Минск. С. 78–92.

7. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Интеллект, 2008. 560 с.

8. Либенсон Г.А. Основы порошковой металлургии. М.: Металлургия. 1975. 200 с.

9. Sun Y., Han T, Hou C., Wang Y., Li Y. et al. Multilayered W–Cu composites with enhanced strength, electrical conductivity and wear resistance // Composites. 2024. V. 283. AN 111641.

10. Zhuo L., Zhang J., Zhang Q., Wang H., Zhao Z. et al. Achieving both high conductivity and reliable high strength for W–Cu composite alloys using spherical initial powders // Vacuum. 2020. V. 181. AN 109620.

11. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023615613, 16.03.2023. Программа на языке Фортран расчета плотности выделений Джоулева тепла двухфазных двумерных матричных систем, содержащих круглые включения, различающиеся проводимостью и размером, JOUFR / Сачков И.Н., Турьгина В.Ф. Заявка № 2023613931 от 06.03.2023.

Информация об авторах

И. Н. Сачков – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Анализ систем и принятие решений» Уральского федерального университета.

О. М. Огородникова – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электронное машиностроение» Уральского федерального университета.

И. И. Огородников – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Квантовая химия и спектроскопия» Института химии твердого тела УрО РАН.

References

- Ogorodnikova, O. M. (2014). O problemakh integratsii vychislitel'nogo materialovedeniya v tsifrovoye mashinostroyeniye. *Informatsionnyye tekhnologii v proyektirovanii i proizvodstve*, (2), 30–34. (In Russ.).
- Ogorodnikova, O. M. (2012). Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye metalla v effektivnom intervale kristallizatsii. *Liteynoye proizvodstvo*, (9), 21–24. (In Russ.).
- Iordan, V. I. & Shmakov, I. A. (2023). Strukturno-fazovyye prevrashcheniya v geterogennykh strukturakh alyuminidov nikelya i titana v protsesse ikh sinteza: molekulyarnodinamicheskoye issledovaniye fazoobrazovaniya. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(3), 289–298. (In Russ.).
- Sachkov, I. N., Ogorodnikova, O. M. & Ogorodnikov, I. I. (2024). Degradatsiya kontaktnykh materialov na osnove Pd–Cu pri protekanii elektricheskogo toka. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 21(3), 337–344. (In Russ.).
- Masanskiy, O. A., Tokmin, A. G., Anisimov, A. G. & Masanskiy, S. O. (2024). Polucheniye alyumomatrichnykh kompozitnykh materialov po tekhnologii elektroimpul'snogo spekaniya. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta*, (1), 37–42. (In Russ.).
- Grigor'yev, E. G., Strizhakov, E. L., Savich, V. V. & Kuznechik, O. O. (2023). Perspektivy razvitiya elektroimpul'snogo spekaniya kak fenomena vysokovol'tnoy konsolidatsii poroshkovykh materialov. *V sb. dokladov 13 Mezhdunarodnogo simpoziuma «Poroshkovaya metallurgiya: inzheneriya poverkhnosti, novyye poroshkovyye kompozitsionnyye materialy. Svarka»*, 5–7 aprelya 2023. Minsk. P. 78–92. (In Russ.).
- Myshkin, N. K., Konchits, V. V. & Braunovich, M. (2008). Elektricheskiye kontakty. *Dolgoprudnyy: Intellect*. P. 560. (In Russ.).
- Libenson, G. A. (1975). *Osnovy poroshkovoy metallurgii*. M.: Metallurgiya. P. 200. (In Russ.).
- Sun, Y., Han, T, Hou, C., Wang, Y. & Li, Y. et al. (2024). Multilayered W–Cu composites with enhanced strength, electrical conductivity and wear resistance. *Composites*, 283, AN 111641.
- Zhuo L., Zhang J., Zhang Q., Wang H. & Zhao Z. et al. (2020). Achieving both high conductivity and reliable high strength for W–Cu composite alloys using spherical initial powders. *Vacuum*, 181, AN 109620.
- Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM RU 2023615613, 16.03.2023. Programma na yazyke Fortran rascheta plotnosti vydeleniy Dzhouleva tepla dvukhfaznykh dvumernykh matrighnykh sistem, soderzhashchikh kruglyye vkluycheniya, razlichayushchiesya provodimost'yu i razmerom, JOUFR / Sachkov I.N., Turygina V.F. Zayavka No. 2023613931 ot 06.03.2023. (In Russ.).

Information about the authors

I. N. Sachkov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of «Systems Analysis and Decision Making», Ural Federal University.

O. M. Ogorodnikova – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of «Electronic Engineering», Ural Federal University.

I. I. Ogorodnikov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of «Quantum Chemistry and Spectroscopy», Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02.09.2024; одобрена после рецензирования 07.10.2024; принята к публикации 02.12.2024.

The article was received by the editorial board on 02 Sept. 2024; approved after reviewing 07 Oct. 2024; accepted for publication 02 Dec. 2024.