

Научная статья
1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)
УДК 669.234:621.3
doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.03.008

ДЕГРАДАЦИЯ КОНТАКТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ Pd–Cu ПРИ ПРОТЕКАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

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. Поиск и расчетное обоснование новых материалов для ответственных элементов измерительных приборов ведется в современных условиях с применением методов компьютерного моделирования. В статье представлены результаты разработки компьютерной модели для оценки неравномерного температурного поля в поверхностном слое электрического контакта, возникающего из-за выделения Джоулева тепла в предположении неровной поверхности соприкосновения. Предложена концепция микроконтактных точек, пиковое повышение температуры в которых приводят к деградации контактных материалов за счет изменения фазового состава и эффектов упорядочения атомов в кристаллической решетке. Выполнены вычислительные эксперименты с использованием авторской программы, процессор которой использует метод конечных элементов.

Ключевые слова: сплавы Pd–Cu, атомное упорядочение, резистивные материалы, электрические контакты, компьютерное моделирование.

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. Деградация контактных материалов на основе Pd–Cu при протекании электрического тока // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2024. Т. 21, № 3. С. 337–344. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.03.008.

Original article

DEGRADATION OF RESISTIVE Pd–Cu-BASED ALLOYS IN ELECTRICAL CONTACTS

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. Recently, computer modeling methods have been effectively used to explore and justify new materials for critical elements of measuring instruments. This paper presents the computer model developed by the authors and the results of its use to assess the uneven temperature field in the surface layer of an electrical contact. The non-uniform temperature distribution arises due to the release of Joule heat under the assumption that the contact surface is not geometrically smooth. The concept of microcontact points on the surface of electrical contacts is proposed. At such points, a peak temperature increase occurs, which leads to degradation of contact materials due to a change in

phase composition. In resistive alloys based on Pd–Cu, the effects of atomic ordering of the crystal lattice are also superimposed. Computational experiments were carried out using the author's program, the solver of which uses the finite element method.

Keywords: Pd–Cu alloys, atomic ordering, resistive materials, electrical contacts, computer modeling.

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) Degradation of resistive Pd–Cu-based alloys in electrical contacts. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 21(3), 337–344. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.03.008.

Введение

В точном приборостроении большое значение имеют резистивные сплавы на основе переходных металлов платиновой группы с заданными техническими характеристиками и упорядоченной кристаллической структурой [1]. Из таких сплавов изготавливают электрические контакты для ответственных потенциометров с повышенными механическими свойствами и другие элементы контактных групп. Упрочнение контактного материала обеспечивается пластической деформацией и упорядочивающим отжигом [2].

В качестве относительно недорогих контактных материалов могут быть использованы сплавы Pd–Cu [3], которые претерпевают упорядочение решетки по типу В2 с образованием объемно-центрированной кубической (ОЦК) структуры при содержании меди 40 и 85 атомных % [4].

В настоящее время активно исследуется кинетика фазовых и структурных превращений в сплавах Pd–Cu в связи с их потенциальным использованием в энергетике [5] из-за малой величины удельного сопротивления и энергии активации диффузии водорода в упорядоченном состоянии [6].

Интерес для исследователей представляют сплавы со смещением состава относительно стехиометрии, что позволяет управлять служебными характеристиками в широком диапазоне значений за счет двухфазной структуры [7].

Важным требованием к контактным парам, предназначенным для передачи слабого электрического сигнала в приборах управления [8], является стабильность работы при включении и выключении. В переходных процессах контакты могут перегреваться и испытывают нагрузку, превышающую номинальное значение. Соответственно, детали контактной пары должны

иметь пониженную взаимную диффузию и сохранять постоянство контактного сопротивления. В процессе эксплуатации происходит деградация контактных поверхностей [9]. Так, перегрев электрических контактов является одной из важнейших причин отказов систем управления.

Традиционный анализ нагрева контактов в режиме эксплуатации предусматривает, что его источником является переходное электрическое сопротивление [10]. При этом не рассматривается микроструктура контактной поверхности. Между тем в реальности любой контакт твердых поверхностей осуществляется через посредство отдельных микроконтактов. И необходимо учитывать, что электрический контакт реализуется не по всей геометрически заданной поверхности, а лишь через конечное число контактных пятен, которые в свою очередь состоят из совокупности микроконтактных точек. Особенности нагрева микроконтактных точек при протекании через них электрического тока до настоящего времени остаются малоизученными.

Цель данной работы заключается в подготовке модели для компьютерного анализа явлений в контактах, выполненных из сплавов Pd–Cu, при протекании электрического тока.

Методы и программные решения

Обоснование и усложнение компьютерной модели выполняется для уточнения и дальнейшего развития программного обеспечения, позволяющего прогнозировать перегрев и физическое состояние электрических контактов в процессе эксплуатации [11].

В численном решении уравнений математической модели для анализируемых процессов использован метод конечных элементов. Нестационарная задача теплопроводности решена в осесимметричной постановке с представлением

ем уравнений в цилиндрической системе координат. Дискретизация расчетного пространства выполнена с применением симплекс-элементов.

Программный код авторской программы написан на императивном компилируемом языке FORTRAN и использует открытые библиотеки вычислительных процедур, в том числе – для матричных вычислений. Преимуществом выбранной среды программирования является совместимость с операционной системой Linux.

Концепция микроконтактных точек электрических контактов

В обычных условиях эксплуатации при осуществлении механического и электрического контакта в контактной паре не происходит настолько тесное сближение двух твердых тел, при котором атомы на поверхности одного тела соединяются с атомами другого тела, образуя единое целое для прохождения тока по всей геометрически идеальной площади касания. Невозможность идеального касания объясняется тем, что даже тщательно обработанные поверхности имеют шероховатость, то есть неровности и выступы, размер которых значительно превышает размер атомов металлов. Другим фактором, препятствующим идеальному касанию, являются тонкие пленки на поверхности, поскольку в результате воздействия окружающей среды поверхности никогда не бывают абсолютно чистыми. На поверхности контактов адсорбируются молекулы кислорода и других газов, металлы вступают во взаимодействие с газами окружающей среды и образуют соединения, пленки со сложным химическим составом. Соответственно, для реализации электрического контакта необходимо механически, контактным нажатием продавить непроводящую пленку и обеспечить взаимную деформацию сближающихся выступов. При этом образуются микроконтакты, группы которых составляют пятна касания.

Рассматривая контакты с позиций геометрической модели, следует учесть, что поверхность твердого тела не может быть абсолютно гладкой. Даже скол по плоскости спайности монокристалла имеет выступы и впадины размерами до десятков и сотен ангстрем, что обусловлено нарушениями кристаллического строения. Из-за неровностей механическое соприкосновение контактов, выполненных из идеально твердого материала, произошло бы в нескольких точках. Реальный материал спосо-

бен деформироваться, соответственно, в локальной области точек касания образуются площадки микронных размеров.

Контакты изготавливаются из поликристаллических материалов, и неровность их рельефа имеет регулярные отклонения двух типов [12, 13]: «волны» и «микровыступы». Рисунок 1 иллюстрирует параметрическое представление профиля поверхности контактного элемента. Волны характеризуются высотой H_1 (в диапазоне от 20 до 40 мкм) и длиной L_1 (в диапазоне от 10 до 200 мкм). На волны накладываются выступы, которые характеризуются высотой H_2 и длиной L_2 с размером менее 1 мкм.

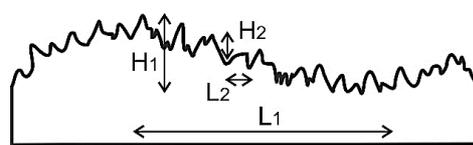


Рис.1. Параметрическое представление профиля поверхности металла

Fig.1. Parametric representation of the metal surface profile

Наличие контактных пятен приводит к перераспределению и концентрации линий электрического тока I , как показано на рис.2.

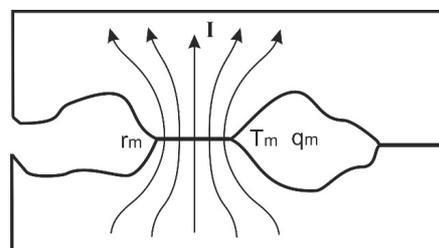


Рис.2. Параметрическое представление электрического микроконтакта

Fig.2. Parametric representation of an electrical microcontact

В параметрическом представлении тепловых процессов в области микроконтакта можно выделить радиус площадки контактирования r_m , плотность выделения Джоулева тепла q_m , температуру в зоне микроконтакта T_m , среднюю температуру контактной поверхности T_k .

Поверхность металлического контакта является главным источником электрического сопротивления всего контакта. При этом величина контактного сопротивления можно считать сопротивлением стягивания R_m , которое является следствием стягивания линий тока к малому

по площади проводящему пятну контакта. Величина сопротивления стягивания [14] определяется радиусом площадки r_m и удельным сопротивлением материала ρ : $R_m = \rho / 2 \times r_m$.

Можно ожидать, что температура микроконтакта значительно превышает среднюю температуру поверхности контакта. Такой локальный перегрев является важнейшим фактором деградации электрического контакта. Поэтому представляет интерес создание компьютерной модели для количественной оценки неоднородного распределения температуры в области микроконтактной точки.

Модель тепловых процессов в области микроконтактной точки

Компьютерный анализ явлений в контактах при протекании электрического тока носит многодисциплинарный характер. Соответственно, в модели необходимо учесть механические, электрические и тепловые эффекты. Механическое нагружение определяет эффективную площадь контакта, от которой в свою очередь зависит температурное поле.

В идеализированной модели, которая предполагает касание контактных тел по всей геометрической поверхности, можно выделить две температурные зоны при движении от поверхности вглубь материала. Эти зоны характеризуются линейными участками с разной интенсивностью убывания на графике зависимости температуры от расстояния (рис.3).

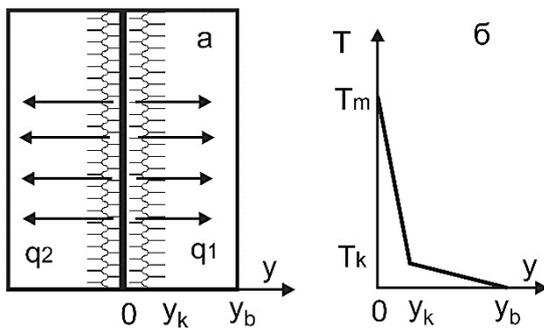


Рис.3. Схема соединения двух контактных тел (а) и традиционно принятая зависимость изменения температуры (б); заштрихованы области переходного сопротивления, q – плотность потоков тепла, T – отклонение температуры от среднего значения

Fig.3. Connection diagram of two contact bodies (a) and the traditionally accepted dependence of temperature change (b); the areas of transition resistance are shaded, q is the heat flow density, T is the temperature deviation from the average value

При переходе к концепции микроконтактных точек изменяется физическая модель. В физической модели микроконтактных точек сделаны следующие допущения.

1) Микроконтакты представлены круглыми площадками S_m , плоскости которых параллельны рабочей плоскости S .

2) Контактные площадки характеризуются усредненным радиусом r_m .

3) Центры микроконтактов расположены регулярно и образуют на рабочей поверхности S узлы гексагональной плотно упакованной структуры с периодом L_k .

4) Шестигранные плотноупакованные призмы можно эквивалентно заменить цилиндрами при условии равенства объемов призматической и цилиндрической ячеек (рис.4б).

5) Для цилиндрических ячеек вводится цилиндрическая система координат (r, y) , начало которой совпадает с центром микроконтактной площадки.

6) Джоулево тепло выделяется при протекании электрического тока в заштрихованной круглой области радиусом r_m , характеризуется плотностью q_m , распространяется по объему цилиндрической ячейки.

На рис.4 изображена схема части контактной поверхности в концепции микроконтактных точек. Пунктирными линиями представлены границы гексагональных элементарных ячеек, совокупность которых образует рассматриваемое контактное тело. Микроконтакты выделены серым цветом.

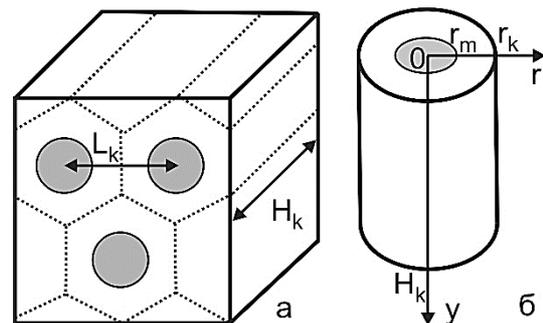


Рис.4. Параметрическое представление цилиндрических ячеек в концепции микроконтактных точек: плотноупакованные гексагональные ячейки (а) и эквивалентный цилиндр (б)

Fig.4. Parametric representation of cylindrical cells in the concept of microcontact points: close-packed hexagonal cells (a) and equivalent cylinder (b)

При переходе от физической модели к компьютерной модели заданы граничные условия,

графически представлены на рис.5. Линия, выделенная черным цветом ($y=0, 0 \leq r \leq r_m$), соответствует граничным условиям второго рода, $q = q_m$. Серая линия ($y = H_k$) устанавливает граничные условия первого рода, $T = T_k$. Пунктир отвечает условию равенства нулю потока через границу, то есть условию зеркальной симметрии и адиабатичности, $q = 0$. Тепловой поток показан стрелками.

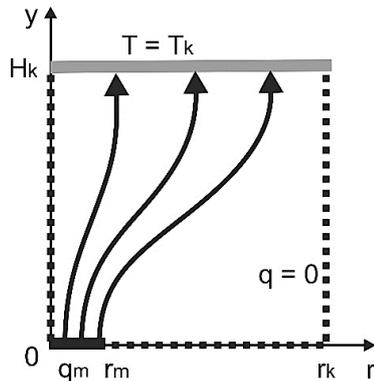


Рис.5. Схема граничных условий в расчетной области

Fig.5. Scheme of boundary conditions in the computational domain

В предложенной модели поток тепла создается на микроконтактной площадке и распространяется в глубину контактного тела, имеющего температуру T_k .

Результаты расчета тепловыделений в области электрических микроконтактов

Проведены вычислительные эксперименты по исследованию геометрических особенностей температурных полей, реализующихся в окрестности электрических микроконтактов. Расчеты выполнены на сетках с плотностью разбиения в сечении 200×200 элементов.

Погрешность расчета значений температуры оценивалась с помощью методик, представленных подробно в [3]. Далее во внимание принимались лишь те результаты, относительная погрешность которых не превышала 0,1 %.

Результаты расчетов выражены в относительных величинах. Параметр $\theta = T / T_k$, характеризует перегрев контакта относительно идеальной линейной зависимости, показанной на рис.3б. Безразмерная радиальная координата $\delta = 2r / L_k$ в цилиндрической системе координат позволяет вывести на общем графике функции температуры для нескольких вариантов геомет-

рии, L_k – среднее расстояние между центрами микроконтактов. На рис.6 представлены характерные расчетные зависимости $\theta(\delta)$ для варьируемых значений относительного радиуса контактной площадки, δ_m .

Следует отметить, что расчетные зависимости $\theta(\delta)$ имеют форму, подобную гауссовой, причем амплитуда кривой равна θ_m , а дисперсия δ_m близка к радиусу микроконтакта.

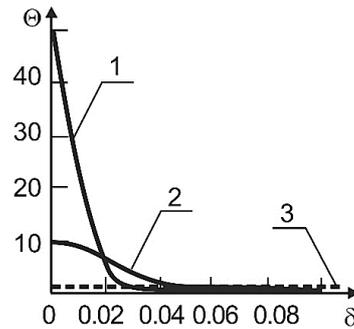


Рис.6. Зависимость относительного перегрева θ от безразмерной радиальной координаты δ ; 1, 2 – относительный радиус равен 0,05 и 0,1 соответственно; пунктир 3 – идеальный контакт

Fig.6. Dependence of relative overheating θ on the dimensionless radial coordinate δ ; 1, 2 – relative radius is 0.05 and 0.1, respectively; dotted line 3 – perfect contact

Механизм деградации двухфазных сплавов Pd–Cu на поверхности контакта

Выделение Джоулева тепла в контактной паре при протекании электрического тока приводит к локальному нагреву материала в контактных точках. При нагреве бинарного сплава Pd–Cu происходит фазовое превращение в соответствии с диаграммой состояний (рис.7), которое может изменить структуру сплава в неоптимальном направлении. Например, в промышленном сплаве с содержанием палладия 47 ат. % (c_0), нагретом до температуры T_0 , образуется смесь неупорядоченной фазы A1 с концентрацией палладия c_{A1} и упорядоченной фазы B2 с концентрацией палладия c_{B2} .

Фаза A1 имеет ГЦК-решетку и удельное сопротивление $0,37 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$. Упорядоченная фаза B2 обладает ОЦК-решеткой и значительно меньшим удельным сопротивлением, равным $0,05 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$. Как правило, заданные резистивные характеристики сплава получают в двухфазном состоянии A1+B2 за счет двух факторов.

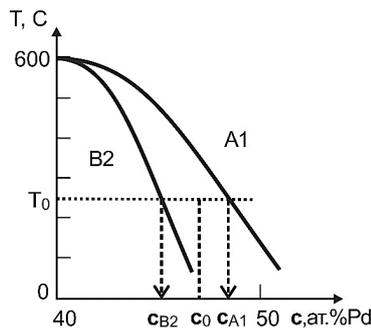


Рис.7. Схема фазовых превращений в сплаве 47 ат. % Pd–Cu при нагреве

Fig.7. Scheme of phase transformations in the 47 at. % Pd–Cu alloy upon heating

Первым фактором является режим термической обработки, который включает нагрев неупорядоченного сплава, регулируемый упорядочивающий отжиг и быстрое охлаждение до комнатной температуры (закалку). Степень упорядочения сплава, измеряемая рентгеновскими методами, и соответственно, содержание низкоомной фазы определяется временем выдержки при повышенной температуре в твердом состоянии.

Вторым фактором регулирования резистивных свойств является легирование сплава Pd–Cu никелем и халькофильными элементами. Легированием можно получить двухфазную смесь, в которой фазы A1 и B2 обладают противоположными значениями температурного коэффициента электрического сопротивления (ТКЭС). В случае успешной технологии синтеза структуры в изделии возникает уникальное состояние с малой суммарной величиной ТКЭС.

Из вычислительных экспериментов следует, что существует три возможных режима нагрева микроконтактных точек при протекании электрического тока, которые различным образом воздействуют на структуру и резистивные свойства сплава.

Низкотемпературный режим (рис.8, режим α) не приводит к выходу низкоомных областей структуры с фазой B2 за границы гомогенности. В таком случае контактный слой сохраняет свою стабильность.

Нагрев до более высоких температур (рис.8, режим β) приводит к реализации режима β , при котором частицы фазы B2 вступают в диффузионное взаимодействие с соседними областями A1. При этом меняется содержание палладия и меди. Соответственно, после достаточно длительного перегрева контактное сопротивление материала меняется, но деграда-

ция эксплуатационных характеристик оказывается незначительной.

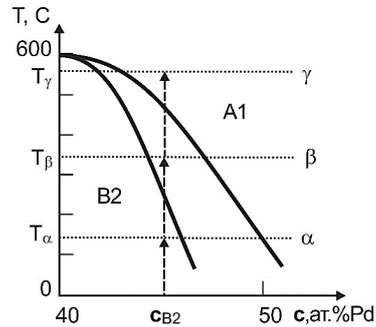


Рис.8. Возможные температурные режимы и локальные изменения фазового строения, возникающие при различных степенях нагрева частиц B2 за счет Джоулева тепла

Fig.8. Possible temperature regimes and local changes in phase structure that arise at different degrees of heating of B2 particles due to Joule heat

Дальнейшее повышение температуры (рис.8, режим γ) приводит к необратимому превращению упорядоченной фазы B2 в неупорядоченное состояние A1. В таком неблагоприятном случае микроконтакт резко увеличивает свое сопротивление, что сопровождается его значительным перегревом.

Величину перегрева можно оценить с помощью приближенных расчетов. Для этого необходимо учесть, что величина нагрева микроконтакта T_m пропорциональна среднему нагреву поверхности T_s и коэффициенту концентрации k_m Джоулева тепла в области микроконтакта. Например, если эксплуатационная температура поверхности составляет 50 °C, а коэффициент k_m превышает величину 15 отн. ед., то микроконтакт гарантированно переходит в высокоомное состояние A1.

Необходимо отметить, что величина k_m , как следует из результатов компьютерного моделирования, пропорциональна среднему расстоянию L_k между микроконтактными точками. Если количество низкоомных микроконтактов уменьшается, и среднее расстояние между ними увеличивается, начинается лавинообразный процесс деградации контактного материала, который завершается аварийным состоянием отказа.

Заключение

Высокий уровень развития современных аппаратно-программных средств компьютерного моделирования позволяет создавать специализированные программы для численного исследования процессов, протекающих в функ-

циональных материалах при различных внешних воздействиях. В данной работе авторская программа использована для исследования процессов деградации резистивного материала при протекании электрического тока через контактную поверхность. По результатам вычислительных экспериментов, выполненных для упорядочивающихся сплавов на основе Pd–Cu, можно сформулировать рекомендации по исследованию и эксплуатации контактных сплавов, склонных к образованию двухфазной структуры с разным уровнем теплового коэффициента электрического сопротивления структурных составляющих.

1. Метод конечных элементов с дискретизацией расчетной области на поверхности 2-мерными симплексами может быть использован для компьютерного анализа неидеальной контактной пары и прогнозирования локальных перегревов электрических контактов.

2. В вычислительных экспериментах с использованием метода конечных элементов показано, что одним из существенных механизмов деградации электрических контактов, выполненных из упорядочивающихся сплавов на основе Pd–Cu, является протекание твердофазных реакций, сопровождаемых ростом неупорядоченной высокоомной компоненты Al.

3. Возможно дальнейшее развитие разработанных в настоящей работе компьютерных методик для оценки вероятного времени перехода контактной пары в аварийное состояние отказа.

4. При анализе процессов деградации электрических контактов в процессе эксплуатации необходимо учитывать возможность реализации температурных режимов, вызывающих лавинообразное падение служебных характеристик из-за структурных изменений материала в микроконтактных точках.

5. В данной работе выполнено исследование на бинарных сплавах. Разработанные компьютерные модели могут быть применены к исследованию более сложных объектов, в частности, композитных резистивных материалов.

Список литературы

1. Огородникова О.М., Литвинов В.С. Кинетика упорядочения сплавов платина-никель-медь по типу L1₀ // Физика металлов и металловедение. 1993. Т. 75, Вып. 6. С. 113–117.

2. Огородникова О.М., Огородников А.И. Компьютерное моделирование технологии изготовления проволоки из платиновых сплавов с повышенными механическими свойствами // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2021. Т. 184, № 4. С. 3–6.

3. Сенченко А.А., Сачков И.Н., Зеленин Л.П., Башкатов А.Н., Котов А.П., Гельд П.В. Влияние температурного и фазового состояния на электрическое сопротивление сплавов Pd,Cu и Pd,Cu,In // Физика металлов и металловедение. 1989. Т. 67, Вып. 1. С. 122–128.

4. Subramanian P.R., Laughlin D.E. Cu–Pd (Copper-Palladium) // Phase Diagram Evaluations. 1991. V, 12, N 2. P. 231–243.

5. Бурханов Г.С., Горина Н.Б., Кольчугина Н.Б., Рошан Н.Р. Сплавы палладия для водородной энергетики // Российский химический журнал. 2006. Т. 1, № 4. С. 36–40.

6. Иевлев В.М., Максименко А.А., Канныкин С.В., Белоногов Е.К., Володина М.С., Рошан Н.Р. Структура и механические свойства конденсированной фольги твердого раствора Pd–Cu // Конденсированные среды и межфазные границы. 2016. Т. 18, № 4. С. 521–529.

7. Novikova O.S., Volkova E.G., Glukhov A.V., Antonova O.V., Kostina A.E. et al. Evolution of the microstructure, electrical resistivity and microhardness during atomic ordering of cryogenically deformed Cu 47 at. % Pd alloy // Journal of Alloys and Compounds. 2020. V. 838. AN 155591.

8. Сафонов В., Сафонов А. Упругие элементы контактных пар // Технологии в электронной промышленности. 2012. Т. 54, № 2. С. 47–56.

9. Zhong L., Fan X., Han K., Chen W., Qian P. A degradation model for separable electrical contacts based on the failure caused by surface oxide film // Microelectronics Reliability. 2022. V. 139. AN 114832.

10. Сачков И.Н., Куанышев В.Т., Кобелев А.М. Разработка компьютерных программ для прогнозирования перегрева и возгорания электрических контактов // Техносферная безопасность. 2023. Т. 41, № 4. С. 60–70.

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., Турыгина В.Ф. Заявка № 2023613931 от 06.03.2023.

12. Демкин Н.Б. Контактное шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970. 334 с.

13. Левин А.П. Контакты электрических соединителей радиоэлектронной аппаратуры. М.: Сов. Радио, 1972. 216 с.

14. Хольм Р.В. Электрические контакты. М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. 464 с.

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. & Litvinov, V. S. (1993). Kinetika uporyadocheniya splavov platina-nikel'-med' po tipu L1₀. *Fizika metallov i metallovedeniye*, 75(6), 113–117. (In Russ.).
- Ogorodnikova, O. M. & Ogorodnikov, A. I. (2021). Komp'yuternoye modelirovaniye tekhnologii izgotovleniya provoloki iz platinovykh splavov s povyshennymi mekhanicheskimi svoystvami. *Informatsionnyye tekhnologii v proyektirovanii i proizvodstve*, 184(4), 3–6. (In Russ.).
- Senchenko, A. A., Sachkov, I. N., Zelenin, L. P., Bashkatov, A. N., Kotov, A. P. & Gel'd, P. V. (1989). Vliyaniye temperaturnogo i fazovogo sostoyaniya na elektricheskoye soprotivleniye splavov Pd,Cu i Pd,Cu,In. *Fizika metallov i metallovedeniye*, 67(1), 122–128. (In Russ.).
- Subramanian, P. R. & Laughlin, D. E. (1991). Cu–Pd (Copper–Palladium). *Phase Diagram Evaluations*, 12(2), 231–243.
- Burkhanov, G. S., Gorina, N. B., Kol'chugina, N. B. & Roshan, N. R. (2006). Splavy palladiya dlya vodorodnoy energetiki. *Rossiyskiy khimicheskii zhurnal*, 1(4), 36–40. (In Russ.).
- Iyevlev, V. M., Maksimenko, A. A., Kannykin, S. V., Belonogov, E. K., Volodina, M. S. & Roshan, N. R. (2016). Struktura i mekhanicheskiye svoystva kondensirovannoy fol'gi tverdogo rastvora Pd–Cu. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy*, 18(4), 521–529. (In Russ.).
- Novikova, O. S., Volkova, E. G., Glukhov, A. V., Antonova, O. V. & Kostina, A. E. et al. (2020). Evolution of the microstructure, electrical resistivity and microhardness during atomic order-

ing of cryogenically deformed Cu 47 at. % Pd alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 838, AN 155591.

8. Safonov, V. & Safonov, A. (2012). Uprugiy elementy kontaktnykh par. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti*, 54(2), 47–56. (In Russ.).

9. Zhong, L., Fan, X., Han, K., Chen, W. & Qian, P. (2022). A degradation model for separable electrical contacts based on the failure caused by surface oxide film. *Microelectronics Reliability*, 139, AN 114832.

10. Sachkov, I. N., Kuanyshev, V. T. & Kobelev, A. M. (2023). Razrabotka komp'yuternykh programm dlya prognozirovaniya peregrevy i vozgoraniya elektricheskikh kontaktov. *Tekhnosfernaya bezopasnost'*, 41(4), 60–70. (In Russ.).

11. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM RU 2023615613, 16.03.2023. Programma na yazyke Fortran rascheta plotnosti vydeleniy Dzhouleva tepla dvukhfaznykh dvumernykh matrichnykh sistem, soderzhashchikh kruglyye vklyucheniya, razlichayushchiyesya provodimost'yu i razmerom, JOUFR / Sachkov I.N., Turygina V.F. Zayavka No. 2023613931 ot 06.03.2023. (In Russ.).

12. Demkin, N. B. (1970). Kontaktirovaniye sherokhovatykh poverkhnostey. M.: Nauka. P. 334. (In Russ.).

13. Levin, A. P. (1972). Kontakty elektricheskikh soyediniteley radioelektronnoy apparatury. M.: Sov. Radio. P. 216. (In Russ.).

14. Khol'm, R. V. (1961). Elektricheskkiye kontakty. M.: Izd-vo inostrannoy literatury. P. 464. (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 08.04.2024; одобрена после рецензирования 07.06.2024; принята к публикации 01.08.2024.

The article was received by the editorial board on 08 Apr. 24; approved after reviewing 07 June 24; accepted for publication 01 Aug. 24.