

УДК 621.762 : 620.22-419 : 669.25

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-4-19-28

Изучение особенностей формирования структуры и свойств порошковых псевдосплавов на основе меди, модифицированных добавками наночастиц ZnO и TiN

© 2017 г. Ю.И. Гордеев, А.К. Абкарян, А.В. Суровцев, А.А. Лепешев

Сибирский федеральный университет (СФУ), г. Красноярск

Красноярский научный центр СО РАН

Статья поступила в редакцию 26.08.16 г., доработана 08.10.16 г., подписана в печать 11.10.16 г.

Комплексные исследования материалов на основе меди Cu–ZnO (нано), Cu–TiN (нано) стандартными методами механических испытаний в сочетании с металлографическими, электронно-микроскопическими исследованиями с использованием энергодисперсионного и термического анализов позволили установить стабильные корреляционные связи между содержанием добавок наночастиц, параметрами микроструктуры и физико-механическими свойствами псевдосплавов. Разработаны и обоснованы технологические приемы повышения однородности распределения модифицирующих добавок наночастиц ZnO и TiN по объему псевдосплава, исключающие их конгломерацию. Предложены новые оригинальные способы введения наночастиц в матричный материал в виде лигатуры из Cu–Al–ZnO или медных порошков, покрытых наночастицами TiN. Высокая удельная поверхность и реакционная способность нанопорошков обеспечивают возможность снижения керамической фазы в электроконтактных материалах (до 2,0–3,0 % вместо 10–15 % в сравнении с известными коммерческими марками). В результате сохраняются на достаточно высоком уровне основные свойства, характерные для матричного материала (меди): тепло- и электропроводность, и, одновременно, повышается общий уровень физико-механических (твердость, прочность, износостойкость) и эксплуатационных свойств композиционных псевдосплавов. Основные характеристики композиционных материалов на основе меди: электросопротивление ($\rho \sim 0,025$ мОм·м), прочность соединения с материалом контактодержателя ($\sigma \sim 2$ МПа), включения дисперсной керамической фазы – обеспечивают снижение электроэрозионного износа (до 2,5 раз) в сравнении с традиционными материалами.

Ключевые слова: наночастицы, композиционные порошки, псевдосплавы на основе меди, микроструктурные параметры, электроконтактные материалы.

Гордеев Ю.И. – канд. техн. наук, доцент кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств (КТОМП) Сибирского федерального университета (СФУ) (660041, г. Красноярск, пр-т Свободный, 79). E-mail: tms-mtf@rambler.ru.

Абкарян А.К. – канд. техн. наук, доцент кафедры машиностроения СФУ. E-mail: abkaryan_artur@mail.ru.

Суровцев А.В. – аспирант кафедры КТОМП СФУ. E-mail: tms-mtf@rambler.ru.

Лепешев А.А. – докт. физ.-мат. наук, проф., Красноярский научный центр СО РАН (660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/50). E-mail: unesco@mail.ru.

Для цитирования: Гордеев Ю.И., Абкарян А.К., Суровцев А.В., Лепешев А.А. Изучение особенностей формирования структуры и свойств порошковых псевдосплавов на основе меди, модифицированных добавками наночастиц ZnO и TiN // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2017. No. 4. С. 19–28.
DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-4-19-28.

Gordeev Yu.I., Abkaryan A.K., Surovtsev A.V., Lepeshev A.A.

Investigation of structure formation features and properties of copper-based powder pseudoalloys modified by ZnO and TiN nanoparticle additives

The multi-method investigation of Cu–ZnO (nano), Cu–TiN (nano) copper-based materials using standard mechanical testing methods along with metallographic, electron-microscopic research using energy-dispersive and thermal analysis allowed to identify stable correlative relationships between the content of nanoparticle additives, microstructure parameters and mechanical-and-physical properties of pseudoalloys. Processing technologies are suggested and justified to improve the uniform distribution of ZnO and TiN modifying nanoparticle additives over the pseudoalloy volume eliminating their conglomeration. The paper proposes novel original methods of nanoparticle introduction to the matrix material as master alloys of Cu–Al–ZnO or copper powders coated with TiN nanoparticles. High surface area and reactive capacity of nanopowders provides for reduced ceramic phase in electrocontact materials (down to 2,0–3,0 % instead of 10–15 % compared with known commercial ones). In this way, general properties typical for matrix materials (copper), i.e. heat and conductivity, remain significantly high, and at the same time, the general level of mechanical-and-physical properties of composite pseudoalloys such as hardness, strength and wear resistance as well as their operational properties is increased. Main properties of copper-based composites include resistivity ($\rho \sim 0,025$ $\mu\Omega\cdot m$), strength of bonding to

the contact support material ($\sigma \sim 2$ MPa), dispersed ceramic phase inclusions that reduce electroerosive wear (2,5 times) in comparison with conventional materials.

Keywords: nanoparticles, composite powders, copper-based pseudoalloys, microstructure parameters, electrocontact materials.

Gordeev Yu.I. – Cand. Sci. (Tech.), associate prof., Department of designing machinery preproduction, Siberian Federal University (SFU) (660041, Russia, Krasnoyarsk, pr. Svobodnyi, 79). E-mail: tms-mtf@rambler.ru.

Abkaryan A.K. – Cand. Sci. (Tech.), associate prof., Department of mechanical engineering, SFU. E-mail: abkaryan_artur@mail.ru.

Surovtsev A.V. – postgraduate student, Department of designing machinery preproduction, SFU. E-mail: tms-mtf@rambler.ru.

Lepeshev A.A. – Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof., Krasnoyarsk Scientific Centre, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (660036, Russia, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/50). E-mail: unesco@mail.ru.

Citation: Gordeev Yu.I., Abkaryan A.K., Surovtsev A.V., Lepeshev A.A. Izuchenie osobennostei formirovaniya struktury i svoystv poroshkovykh psevdospлавov na osnove medi, modifitsirovannykh dobavkami nanochastits ZnO i TiN. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2017. No. 4. P. 19–28. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-4-19-28.

Введение

Анализ накопленной информации об основных физико-механических и эксплуатационных свойствах электроконтактных материалов показывает, что к ним предъявляются разнообразные, зачастую противоречащие друг другу требования. Создание электроконтактных материалов на основе меди и производство изделий из них требуют реализации в одном псевдосплаве разнообразных свойств: достаточно высокой (соизмеримой с серебром) электро- и теплопроводности и, одновременно, твердости, прочности, износостойкости, коррозионной и электроэрозионной стойкости. Для обеспечения всего комплекса многочисленных свойств, которые определяют надежную эксплуатацию в самых разнообразных условиях, в структуру композиционного электроконтактного материала вводятся дисперсно-упрочняющие, тугоплавкие и антифрикционные добавки. Это позволяет за счет рационального подбора фазовых составляющих реализовать требуемый набор свойств [1–12].

Ранее авторами [13, 14] и другими исследователями [15–22] было показано, что использование добавок нанопорошков для реализации градиента функциональных свойств не имеет альтернативы при создании материалов электротехнического назначения на основе меди, так как они могут обеспечивать требуемый дополнительный эффект при пониженном количестве добавок к матричному материалу, не снижая его собственных характеристик.

Хорошо известно, что применение традиционных методов смешивания и консолидации приводит к увеличению начальных размеров и агломерированию наночастиц, а также охрупчиванию матричного материала [15, 19, 20]. Поэтому для

получения материалов с повышенным уровнем свойств и однородным распределением изолированных наночастиц необходимо уменьшить их химическое взаимодействие и агломерирование за счет альтернативных методов, например интенсивной пластической деформации, экструзии [1–5, 20].

Целью настоящей работы являются разработка и обоснование новых технологических приемов и способов введения наночастиц керамик ZnO и TiN в структуру электроконтактных материалов на основе меди, что обеспечивает их однородное равномерное распределение по объему и, как результат, повышение физико-механических свойств псевдосплавов на основе меди.

Методика проведения исследований

Пластифицированные порошковые смеси на основе меди различного химического и гранулометрического состава прессовались в пресс-формах с жесткой матрицей при удельном давлении прессования $P \leq 500$ МПа в таблетки диаметром 10×10 мм, образцы электроконтактов КМК101020 (ТУ 16-685.020-85), контрольные штабики 5×10×50 мм и пластины толщиной 0,5 мм для проведения лабораторных экспериментальных исследований физико-механических свойств и стендовых эксплуатационных испытаний.

Спеченные в несколько этапов в вакууме образцы дополнительно калибровали при $P = 800 \div +1000$ МПа, после чего подвергали отжигу в вакууме при $t = 500 \pm 20$ °С для снятия остаточных напряжений. Исследования микроструктуры проводили в Центре коллективного пользования

СФУ методами электронной микроскопии и энергодисперсионного микроанализа по спектрам характеристического рентгеновского излучения на микроскопах «Jeol JSM 6490LV», «Jeol JSM 7001F» (фирма «Jeol», Япония) с системой микроанализаторов «Oxford Instruments», «Hitachi TM 1000» («Hitachi», Япония) и оптическом микроскопе «Zeiss Observer Z1m» («Carl Zeiss», Германия). Интенсивность процессов уплотнения оценивали на dilatометре DIL 402 («Netzsch», Германия), термоанализ — на дериватографах «Jupiter STA449C» («Netzsch», Германия) и SDT Q600 V20.5 («Netzsch», Германия), рентгенофазовый анализ — на дифрактометре «D8 Advance» («Bruker», Германия), смачиваемость материалов контакта — на универсальной вакуумной установке «Капля» (ООО НИИ «Изотерм» г. Брянск). На базе ЦЗЛ Дивногорского завода низковольтной аппаратуры проводились испытания электроконтактов по твердости, удельному электросопротивлению, интенсивность изнашивания (электроэрозионный износ) определялась по стандартам ISO и отраслевым методикам.

Результаты исследований и их обсуждение

При постановке целей и задач экспериментальных исследований исходили, прежде всего, из необходимости обеспечения стойкости к воздействию электрической дуги и предотвращения свариваемости при пиковых токовых нагрузках (включение—выключение). Анализ накопленных данных по результатам исследований показывает, что это может быть достигнуто за счет дугогасящих доба-

вок керамических соединений (CdO , CuO , ZnO , WC , TiN) либо высокотемпературных металлов (Mo , W).

При определении необходимого (оптимального) количества оксидной (ZnO) или нитридной (TiN) фазы в структуре гетерофазных композиционных псевдосплавов предварительно расчетными и экспериментальными методами производилась численная оценка требуемых концентраций добавок наночастиц, в том числе с использованием стереологических моделей для бимодальных систем [23].

Электронно-микроскопическое изучение микроструктуры, а также данные других исследователей [15–18, 20] свидетельствуют, что превышение «пороговой» концентрации (около 8 мас.%) приводит к формированию агрегатов из наночастиц и каркасной сетки по границам зерен. Такие структурные метаморфозы недопустимы из-за существенного роста электросопротивления (до 120 мкОм) и одновременного охрупчивания матричного материала, снижения прочности (в 1,5–2,0 раза).

Для предотвращения таких неблагоприятных эффектов предложены новые оригинальные способы введения наночастиц в структуру материала в виде лигатуры. Для изготовления электроконтактных материалов использовали: порошок меди ПМС-1 (ГОСТ 4960-2009) со средним размером частиц $d = 7$ мкм; порошок оксида цинка (полученный ударно-волновым синтезом или методом химического осаждения из раствора солей) с частицами размером $d = 8$ нм (рис. 1, а) [15, 24, 25]; композиционные слоистые порошки меди, плакированные наноразмерным слоем частиц нитрида

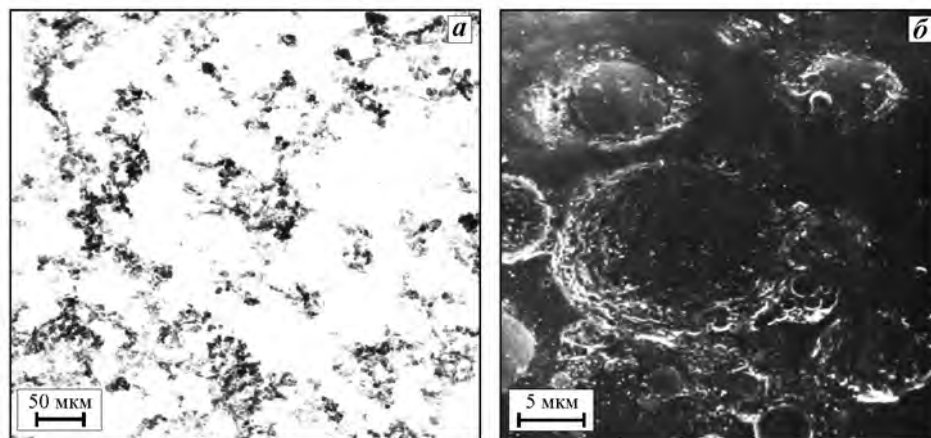


Рис. 1. Микрофотографии нанопорошков — добавок к псевдосплавам
а — наночастицы ZnO ; б — порошок меди, покрытый «шубой» из наночастиц TiN

титана, синтезированные в плазме дугового разряда низкого давления (рис. 1, б) [26].

Псевдосплавы Cu–ZnO (нано)

Отрицательное влияние оксидной фазы на электропроводность и условия теплоотвода удалось снизить за счет введения нанопорошка ZnO в состав основной смеси в качестве лигатуры с порошками меди и алюминия в пропорции 94 % Al — 6 % Cu. Предварительно были проведены модельные экспериментальные исследования лигатур Al—Cu с использованием наноразмерных порошков меди ($d = 0,17$ мкм, площадь удельной поверхности $S = 3,9$ м²/г) и алюминия ($d = 0,13$ мкм,

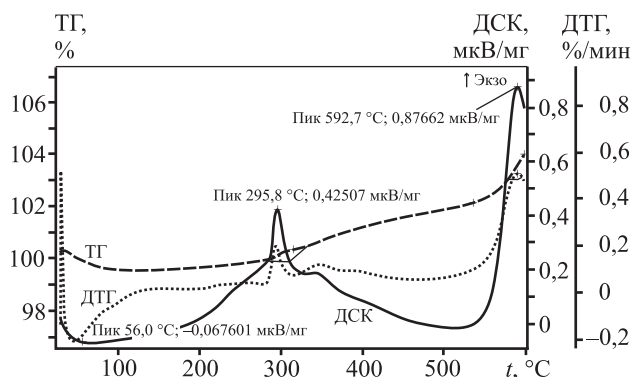


Рис. 2. Результаты термоанализа смеси, состоящей из нанопорошков меди и алюминия

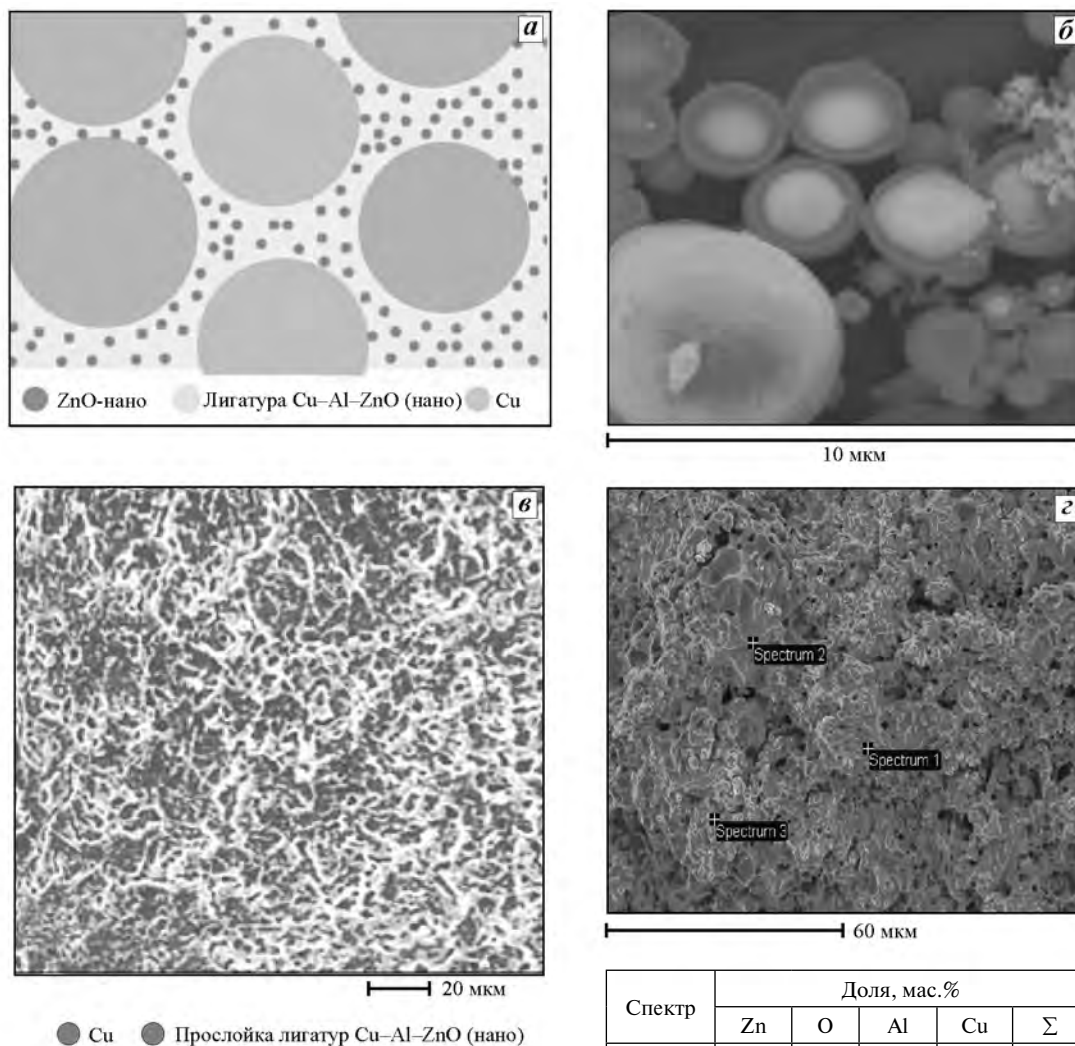


Рис. 3. Формирование структуры псевдосплава на основе меди с добавками керамических наночастиц ZnO

a – схема распределения добавок наночастиц в прослойке алюминиевой бронзы; b – порошки лигатуры Al–Cu; θ – образование прослоек алюминиевой бронзы; z – включения наночастиц ZnO на поверхности излома

Спектр	Доля, мас.%				
	Zn	O	Al	Cu	Σ
1	1,98	2,72	2,33	92,97	100,00
2	1,52	0,54	0,59	97,35	100,00
3	—	1,52	1,51	96,97	100,00

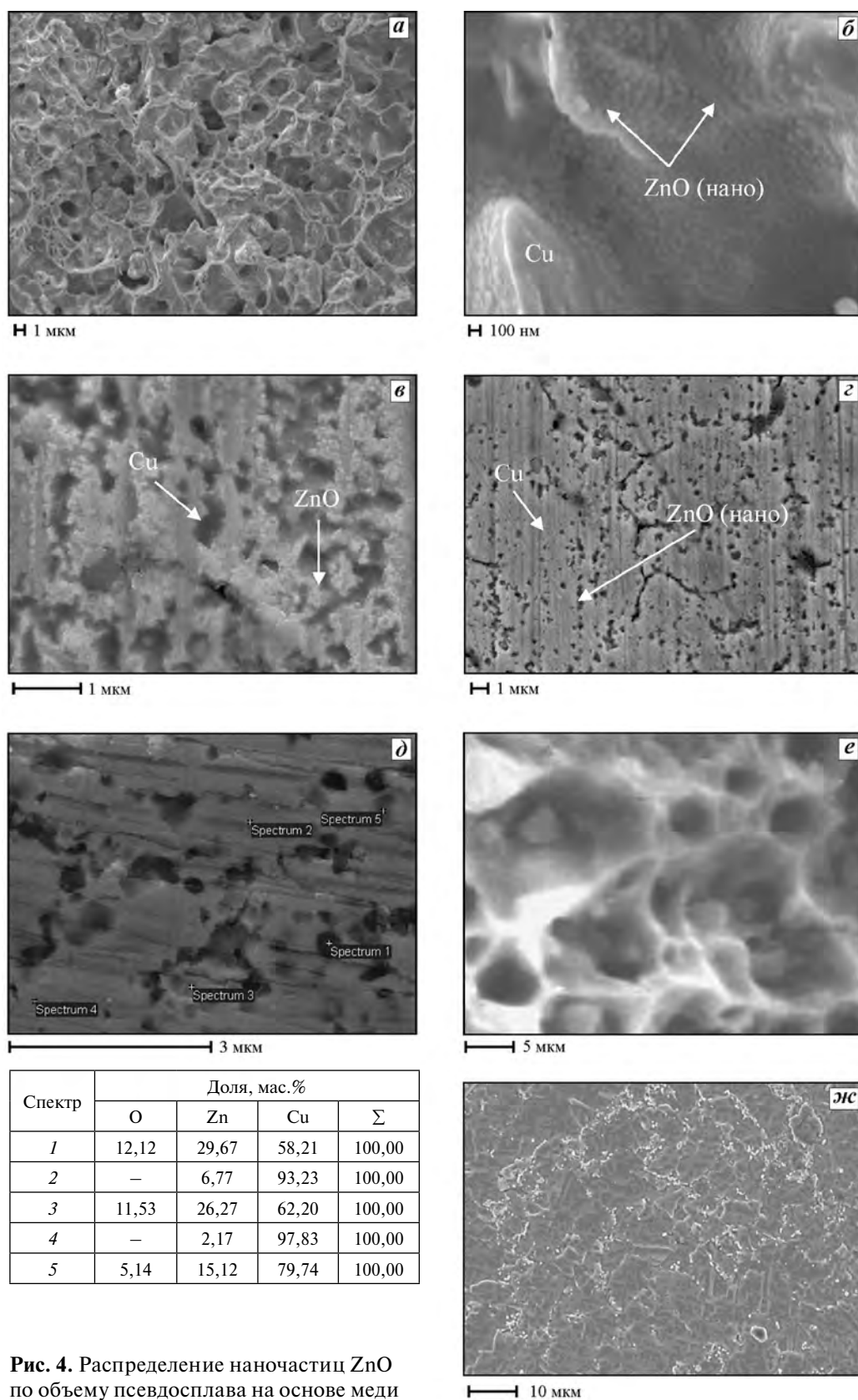


Рис. 4. Распределение наночастиц ZnO по объему псевдосплава на основе меди

а, б — по излому; **в–д** — по поверхности; **е** — ямки дисперсно-упрочняющих добавок ZnO на изломе; **ж** — характер распределения включений наночастиц по границам зерен меди

$S = 16 \text{ м}^2/\text{г}$), полученных методом электровзрыва проволок [10].

Особенности процессов структурообразования порошковых псевдосплавов с применением лигатуры Cu—Al из смеси наночастиц изучались методами оптической и растровой электронной микроскопии и термоанализа (ДТА, ДСК, ТГ — рис. 2).

При температуре $t \sim 548 \text{ }^\circ\text{C}$ начинается экзотермическая реакция с образованием алюминиевой бронзы из наночастиц меди и алюминия. В дальнейшем производилось введение в лигатуру из смеси нанопорошков меди и алюминия добавок наночастиц оксида цинка, количество которых в лигатуре варьировалось в диапазоне 6—12 мас.%. В свою очередь, содержание лигатуры из порошков Cu—Al—ZnO (нано) в составе основного матричного материала меди составляет 1—5 мас.%. Из совокупности данных, полученных методами ДТА, РФА и электронной микроскопии, следует, что интенсивности тепловыделения (от 875 до 2250 Дж/г) достаточно для образования в локальных зонах между матричными (микронными) зернами меди прослоек алюминиевой бронзы (рис. 3). Саморазогрев лигатуры Cu—Al—ZnO (нано) и дальнейшая гомогенизация структуры композиционного псевдосплава при спекании (до температуры около 920 °C) позволяют равномерно перераспределить дисперсные частицы ZnO по объему матричной меди (см. рис. 3, 4).

Характер распределения добавок наночастиц по объему псевдосплава иллюстрируется данными электронно-микроскопического анализа (рис. 4). Изучение распределения фаз и определение элементного состава проведены с использованием метода энергодисперсионного микроанализа (по спектрам характеристического рентгеновского излучения) и метода композиционного контраста. Результаты определения элементного состава в атомном соотношении приведены в таблице к рис. 4, д.

Равномерно распределенные за счет экзотермической реакции по объему меди наночастицы способствуют сохранению мелкозернистой структуры основного материала, одновременно дисперсно упрочняют псевдосплав (величина твердости возрастает до 110 НВ по сравнению с 60—70 НВ для матричной меди). Повышение прочности подтверждается экспериментальными данными (см. таблицу на с. 26) измерения микротвердости и снижением величины абразивного износа (наряду с обеспечением дугогасящих свойств). Наночасти-

цы распределены, как правило, по границам зерен матричного материала (меди) (рис. 4, ж), но также и по материалу внутри зерен. Присутствуют фазы более крупных агрегатов с размерами 0,1—0,5 мкм, образованных из наночастиц ZnO.

Однако частичная агломерация наночастиц не снижает общего требуемого уровня свойств электроконтактного материала (сопоставимого со свойствами стандартных марок на основе серебра КМК-А10М (Ag—CdO)).

Псевдосплавы Cu—TiN (нано)

Однородность распределения керамической фазы (TiN) по объему матрицы в псевдосплавах медь—TiN обеспечивалась за счет использования композиционных слоистых порошков меди, плакированных TiN на стадии предварительной подготовки перед смешиванием (напылением в плазме дугового разряда низкого давления) [6, 10]. Композиционные порошки Cu—TiN (см. рис. 1, б) вводились в состав смеси в виде дополнительной гранулированной фракции (лигатуры). Объемное содержание лигатуры изменялось в диапазоне от 4 до 10 мас.% от основного объема порошковой меди. Результаты изучения микроструктуры этой группы композиционных электроконтактных материалов с применением компьютерных методов анализа изображений показали высокую степень однородности распределения фазовых составляющих по поверхности (объему) псевдосплава (рис. 5, а). Отличительной особенностью параметров структуры является достаточно регулярное равномерное распределение «цепочек» из наночастиц TiN по интерфейсным границам зерен меди.

Исследования микроструктуры псевдосплавов Cu—TiN (нано) после доуплотнения показывают, что в процессе калибровки происходит частичное или полное разрушение хрупких границ TiN, сформированных цепочками наночастиц. После повторного спекания формируется структура с дисперсно-упрочняющими, не связанными друг с другом включениями TiN (рис. 5, б). На рис. 6 представлены результаты изучения основных свойств материалов Cu—TiN (нано) с различным содержанием керамической фазы по значениям удельного электросопротивления и коммутационного износа (зависящего от прочности и твердости матричного материала), которые показывают, что с увеличением концентрации наночастиц TiN величина относительного коммутационного износа изменяется немонотонно. При содержа-

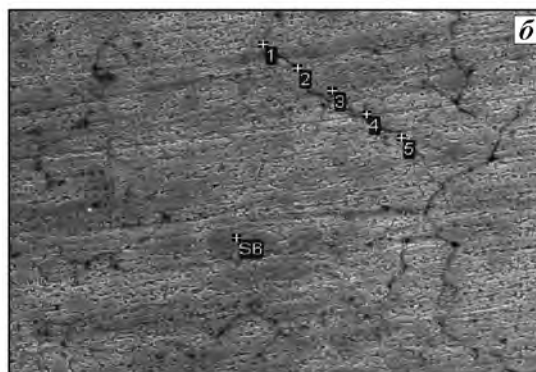
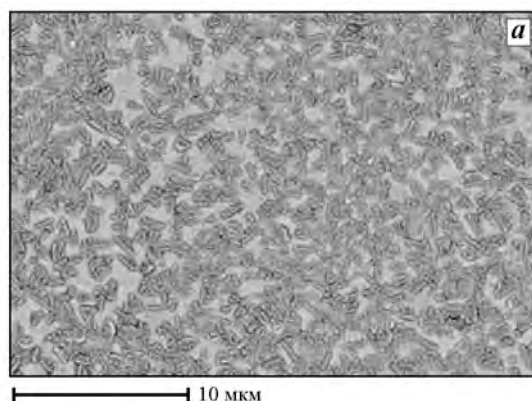


Рис. 5. Микроструктура контактных материалов на основе Cu–TiN (нано)

a – Cu–TiN (нано)

б – SEM-микроструктура Cu–TiN (нано) (×3000)

Спектр	Доля, мас.%			
	N	O	Ti	Cu
Суммарный	0,16	0,92	0,47	98,45
1	1,13	–	1,68	97,19
2	0,53	–	0,59	98,87
3	–	–	–	100,0
4	1,92	–	1,24	96,84
5	0,57	0,87	1,07	97,49
6	–	–	–	100,0

нии керамической фазы (наночастиц) до 2,5 мас.% реализуется эффект дисперсного упрочнения, повышаются общая твердость и микротвердость композиционного материала за счет керамической фазы, соответственно снижается коммутационный износ (ϵ) (обл. 1, рис. 6). Однако по достижении критической пороговой концентрации добавок наночастиц (для этого материала — 5 мас.%) увеличиваются степень их контактности, агломерирование до более крупных образований — материал охрупчивается, а также интенсивность износа (ϵ) (обл. 2, рис. 6). Такие структурные метаморфозы объясняют также характер изменения удельного электросопротивления — с повышением концентрации керамической фазы величина ρ монотонно возрастает. Это достаточно известный эффект, который подтверждается и результатами других исследований [2, 7].

Можно заключить, что экспериментально установленная оптимальная область нанодобавок TiN к матричному материалу меди лежит в диапазоне 2–3 мас.% (обл. 3, рис. 6), где материал имеет приемлемый уровень электросопротивления и, одновременно, пониженный коммутационный износ.

Таким образом, оба реализованных способа получения псевдосплавов Cu–ZnO (нано) и Cu–TiN (нано), а именно поверхностная обработка исходных порошков меди перед смешиванием путем нанесения покрытий керамической фазы (в

нашем случае — нитрида титана) либо предварительное замешивание нанодобавок в виде (составе) легкоплавкой лигатуры из нанопорошков (Cu–Al–ZnO), обеспечивают однородное равномерное распределение добавок керамики (TiN, ZnO) по объему смеси, компакта, в структуре конечного спеченного материала и, как результат, повышенный уровень комплекса свойств (см. таблицу на с. 26).

Проведенные эксплуатационные испытания электроконтактов на основе предложенных способов позволили определить оптимальные со-

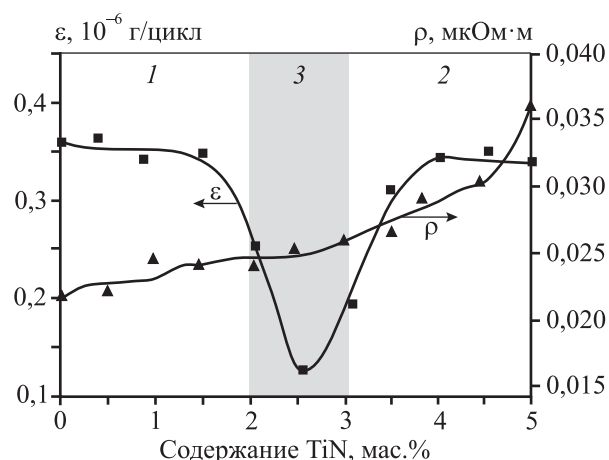


Рис. 6. Зависимость коммутационного износа (ϵ) и удельного сопротивления (ρ) от содержания TiN в материале

Составы и свойства исследованных электроконтактных материалов на основе меди

Образец	Состав материала, мас. %			Свойства					
	TiN	ZnO	Cu	Плотность (γ), г/см ³	Твердость, HV	Уд. электро-сопротивление (ρ), мкОм·м	Коммутационный износ (ϵ), 10 ⁻⁶ г/цикл	Температура на контактодержателе, °C	Предел прочности ($\sigma_{среза}$), МПа
1	0,4	2,5	Ост.	8,6	110	0,021	0,280	60	2,1
2	1,0	2,5	Ост.	8,6	110	0,022	0,310	73	2,0
3	2,5	2,5	Ост.	8,7	117	0,025	0,092	65	2,0
4	4,0	2,5	Ост.	8,6	120	0,027	0,340	78	1,8
5	5,0	2,5	Ост.	8,6	126	0,037	0,350	78	1,7

ставы материалов контактной пары, которые обеспечивают допустимый уровень перегрева в условиях длительного включения (более 15 сут) — 65 °C, коммутационный износ — $0,092 \cdot 10^{-6}$ г/цикл, удельное электросопротивление материалов контактной пары — 0,025 мкОм·м. Отмечаются удовлетворительное сдувание дуги, размыкание контактной пары в условиях короткого замыкания (по результатам испытаний на предельную коммутационную способность). Результаты стендовых испытаний представлены в таблице.

Разработанные материалы контактной пары на основе меди по своим характеристикам отвечают требованиям ТУ 16-685.020-85 и могут быть рекомендованы для замены стандартных контактов на основе серебра в диапазоне токовых нагрузок до 100 А (до 500 А при кратковременном включении).

Выводы

1. Получены новые данные об особенностях формирования структуры композиционных псевдосплавов на основе меди, модифицированных наночастицами ZnO и TiN, на основании чего предложены и обоснованы эффективные технологические способы введения наночастиц в состав порошкового материала на основе меди. Введение наночастиц в структуру материала за счет использования жидкофазного распределения по лигатуре алюминиевой бронзы или применения композиционных слоистых порошков «медь — нитрид титана» обеспечивает однородное равномерное распределение добавок наночастиц керамической фазы по объему матричного материала (меди).

2. Определены оптимальные области добавок модифицирующих наночастиц ZnO и TiN (до 2,0—3,0 % вместо 10—15 % в сравнении с известными

промышленными марками), при которых сохраняются на требуемом уровне основные свойства матричного материала (меди) — удельное электросопротивление (около 0,025 мкОм·м) и электропроводность, прочность паяного соединения с материалом контактодержателя ($\sigma_{среза} \sim 2$ МПа) и, одновременно, за счет дисперсных включений керамической фазы снижается электроэрозионный износ (в 2,5 раза) в сравнении со стандартными материалами, обеспечиваются гашение дуги и предотвращение свариваемости материалов контактной пары, общая эксплуатационная стойкость электроконтактных изделий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-08-00789 а).

Литература

1. Гнесин Г.Г. Спеченные материалы для электротехники и электроники: Справ. изд. М.: Металлургия, 1981.
2. Braunovic M., Konchits V.V., Myshkin N.K. Electrical contacts: Fundamentals, applications, and technology. London, N.Y.: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2007.
3. Holm H. Electric contacts. Berlin: Springer-Verlag, 2010.
4. Doducodate book of electrical contacts. Doduco GmbH — Stieglitz Verlag, Auflage, Neuauflage, 2012.
5. Zhou D., Qiu F., Wan H., Jian Q.J. Manufacture of nano-sized particle-reinforced metal matrix composites // Rev. Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.). 2014. Vol. 27. No. 5. P. 798—805.
6. Slade P.G. High current contacts: A review and tutorial // Proc. 21st Intern. Conf. on electrical contacts (Sept. 2002). Zurich, Switzerland: University of Zurich, 2002. P. 413—424.

7. Ahn B.D., Kang H.S., Kim J.H., Jee S.H., Yoon Y.S., Kim D.J. Synthesis and analysis of Ag-doped ZnO // *J. Appl. Phys.* 2006. No. 100. P. 093701.
8. Dulin F.H., Rase D.E. Phase equilibria in the system ZnO—TiO₂ // *J. Amer. Ceram. Soc.* 1960. Vol. 43. No. 3. P. 125—131.
9. Findik F., Uzun H. Microstructure, hardness and electrical properties of silver-based refractory contact materials // *Mater. Design.* 2003. No. 24. P. 489—492.
10. Shubin A.A., Sidorak A.V., Ivanov V.V. Synthesis of complex oxides CdO—ZnO—SnO₂ for electrical contacts // *Russ. J. Appl. Chem.* 2014. Vol. 87. No. 3. P. 258—264.
11. Hemmi R., Yokomizu Y., Matsumura T. Anode-fall and cathode-fall voltages of air arc in atmosphere between silver electrodes // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2003. Vol. 36. P. 1097—1106.
12. Leung C., Streicher E., Fitzgerald D. Welding behavior of Ag/SnO₂ contact material with microstructure and additive modifications // *Proc. 50th IEEE Holm Conf. on electrical contacts and the 22nd Intern. Conf. on electrical contacts* (20—24 Sept. 2004). Seattle, USA, 2004. P. 64—69.
13. Gordeev Yu.I., Zeer G.M., Zelenkova E.G., Abkaryan A.K., Surovtsev A.V., Teremov S.G., Plotnikov N.P. Prospects of nanoparticles application in contact of urban electric transport // *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2012. Vol. 53. No. 4. P. 351—355.
14. Gordeev Yu.I., Abkaryan A.K., Zeer G.M., Lepeshev A.A., Zelenkova E.G. Effect of liquid-phase sintering as means of quality enhancement of pseudoalloys based on copper // *IOP Conf. Ser. J. Phys.* 2017. Vol. 803. P. 012050.
15. Николаева Н.С., Иванов В.В., Шубин А.А., Сидорак А.В. Электропроводность композита Ag/ZnO на основе химически осажденных смесей // *Персп. материалы.* 2013. No. 8. С. 68—73.
16. Zhu Y., Zhou Y. Preparation of pure ZnO nanoparticles by a simple solid-state reaction method // *Appl. Phys. A.* 2008. Vol. 92. P. 275—278.
17. Norton D.P., Heo Y.W., Ivill M.P. ZnO: growth, doping and processing // *J. Mater. Today.* 2004. Vol. 6. P. 34—40.
18. Hahn Y.B. Zinc oxide nanostructures and their applications // *Korean J. Chem. Eng.* 2011. Vol. 28. No. 9. P. 1797—1813.
19. Andrievski R., Glazer A. Strength of nanostructures // *UFN.* 2009. Vol. 179. No. 4. P. 337—358.
20. Колобов Ю.Р., Валиев Р.З. Зернограничная диффузия и свойства наноструктурных материалов. Новосибирск: Наука, 2001.
21. Зеер Г.М., Зеленкова Е.Г., Белоусов О.В., Белецкий А.А., Николаев С.И., Ледяева О.Н. Электроконтактный материал на основе серебра, дисперсно упрочненный никелем, оксидами титана и цинка // *Физика металлов и металловедение.* 2017. Т. 118. No. 9. С. 935—940.
22. Zeer G.M. Investigation of the microstructure and properties of electrocontact silver-zinc oxide nanopowder material // *Phys. Met. Metallogr.* 2012. Vol. 113. No. 9. P. 902—906.
23. Gordeev Y.I., Abkaryan A.K., Binchurov A.V., Yasinsky V.B. Design and investigation of hard metal composites modified by nanoparticles // *Adv. Mater. Res.* 2014. Vol. 1040. P. 13—18.
24. Кориунов А.В. Размерные структурные эффекты в процессах окисления металлов. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2013.
25. Белошанко А.Г., Букаемский А.А., Кузьмин И.Г., Ставер А.М. Динамический синтез порошков диоксида циркония // *Физика горения и взрыва.* 1993. Vol. 29. No. 6. С. 111—112.
26. Ушаков А.В., Редькин В.Е., Жарков С.М., Соловьев Л.А. Влияние давления газовой смеси на свойства электродуговых порошков нитрида титана // *Неорган. материалы.* 2003. Vol. 39. No. 3. С. 337—341.

References

1. Gnesin G.G. *Spechennye materialy dlya elektrotekhniki i elektroniki: Sprav. izd. [Sintered materials for electrical engineering and electronics: Reference ed.]*. Moscow: Metallurgiya, 1981.
2. Braunovic M., Konchits V.V., Myshkin N.K. *Electrical contacts: Fundamentals, applications, and technology*. London, N.Y.: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2007.
3. Holm H. *Electric contacts*. Berlin: Springer-Verlag, 2010.
4. *Doducodate book of electrical contacts*. Doduco GmbH — Stieglitz Verlag, Auflage, Neuauflage, 2012.
5. Zhou D., Qiu F., Wan H., Jian Q. J. Manufacture of nano-sized particle-reinforced metal matrix composites. *Rev. Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)*. 2014. Vol. 27. No. 5. P. 798—805.
6. Slade P.G. High current contacts: A review and tutorial. In: *Proc. 21st Intern. Conf. on electrical contacts* (Sept. 2002). Zurich, Switzerland: University of Zurich, 2002. P. 413—424.
7. Ahn B.D., Kang H.S., Kim J.H., Jee S.H., Yoon Y.S., Kim D.J. Synthesis and analysis of Ag-doped ZnO. *J. Appl. Phys.* 2006. No. 100. P. 093701.
8. Dulin F.H., Rase D.E. Phase equilibria in the system ZnO—TiO₂. *J. Amer. Ceram. Soc.* 1960. Vol. 43. No. 3. P. 125—131.
9. Findik F., Uzun H. Microstructure, hardness and electrical properties of silver-based refractory contact materials. *Mater. Design.* 2003. No. 24. P. 489—492.

10. Shubin A.A., Sidorak A.V., Ivanov V.V. Synthesis of complex oxides CdO—ZnO—SnO₂ for electrical contacts. *Russ. J. Appl. Chem.* 2014. Vol. 87. No. 3. P. 258—264.
11. Hemmi R., Yokomizu Y., Matsumura T. Anode-fall and cathode-fall voltages of air arc in atmosphere between silver electrodes. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2003. Vol. 36. P. 1097—1106.
12. Leung C., Streicher E., Fitzgerald D. Welding behavior of Ag/SnO₂ contact material with microstructure and additive modifications. In: *Proc. 50th IEEE Holm Conf. on electrical contacts and the 22nd Intern. Conf. on electrical contacts* (20—24 Sept. 2004). Seattle, USA, 2004. P. 64—69.
13. Gordeev Yu.I., Zeer G.M., Zelenkova E.G., Abkaryan A.K., Surovtsev A.V., Teremov S.G., Plotnikov N.P. Prospects of nanoparticles application in contact of urban electric transport. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2012. Vol. 53. No. 4. P. 351—355.
14. Gordeev Yu.I., Abkaryan A.K., Zeer G.M., Lepeshev A.A., Zelenkova E.G. Effect of liquid-phase sintering as means of quality enhancement of pseudoalloys based on copper. In: *IOP Conf. Ser. J. Phys.* 2017. Vol. 803. P. 012050.
15. Nikolaeva N.S., Ivanov V.V., Shubin A.A., Sidorak A.V. Elektroprovodnost' kompozita Ag/ZnO na osnove khimicheskoi osazhennykh smesei [The conductivity of the composite Ag/ZnO-based chemically precipitated mixtures]. *Perspektivnye materialy.* 2013. No. 8. P. 68—73.
16. Zhu Y., Zhou Y. Preparation of pure ZnO nanoparticles by a simple solid-state reaction method. *Appl. Phys. A.* 2008. Vol. 92. P. 275—278.
17. Norton D.P., Heo Y.W., Ivill M.P. ZnO: growth, doping and processing. *J. Mater. Today.* 2004. Vol. 6. P. 34—40.
18. Hahn Y.B. Zinc oxide nanostructures and their applications. *Korean J. Chem. Eng.* 2011. Vol. 28. No. 9. P. 1797—1813.
19. Andrievski R., Glazer A. Strength of nanostructures. *UFN.* 2009. Vol. 179. No. 4. P. 337—358.
20. Kolobov Yu.R., Valiev R.Z. Zernogranichnaya diffuziya i svoystva nanostrukturnykh materialov [Grain boundary diffusion and properties of nanostructured materials]. Novosibirsk: Nauka, 2001.
21. Zeer G.M., Zelenkova E.G., Belousov O.V., Beletskii A.A., Nikolaev S.I., Ledyeva O.N. Elektrokontaktnyi material na osnove serebra, dispersno uprochnennyyi nikel'm, oksidami titana i tsinka [Electric contact material based on silver, dispersion strengthened by nickel, oxides of titanium and zinc]. *Fizika metallov i metallovedenie.* 2017. Vol. 118. No. 9. P. 935—940.
22. Zeer G.M. Investigation of the microstructure and properties of electrocontact silver-zinc oxide nanopowder material. *Phys. Met. Metallogr.* 2012. Vol. 113. No. 9. P. 902—906.
23. Gordeev Y.I., Abkaryan A.K., Binchurov A.V., Yasinsky V.B. Design and investigation of hard metal composites modified by nanoparticles. *Adv. Mater. Res.* 2014. Vol. 1040. P. 13—18.
24. Korshunov A.V. Razmernye strukturnye efekty v protsessakh okisleniya metallov. [Dimensional structural effects in the metal oxidation process]. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2013.
25. Beloshapko A.G., Bukaemskii A.A., Kuz'min I.G., Staver A.M. Dinamicheskii sintez poroshkov dioksida tsirkoniya [Dynamic synthesis of powders of zirconium dioxide]. *Fizika gorennya i vzryva.* 1993. Vol. 29. No. 6. P. 111—112.
26. Ushakov A.V., Red'kin V.E., Zharkov S.M., Solov'ev L.A. Vliyaniye davleniya gazovoi smesi na svoystva elektrodugovykh poroshkov nitrída titana [The effect of pressure on the properties of the gas mixture of powders of titanium nitride electric]. *Neorganicheskie materialy.* 2003. Vol. 39. No. 3. P. 337—341.