

## **ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОРОШКОВЫХ ПСЕВДОСПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ДОБАВКАМИ НАНОЧАСТИЦ ZnO И TiN**

Ю.И. Гордеев<sup>1</sup>, А.К. Абкарян<sup>1</sup>, А.В. Суровцев<sup>1</sup>, А.А.Лепешев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет (СФУ), г. Красноярск

<sup>2</sup>Красноярский научный центр Сибирского отделения АН РФ, г. Красноярск

Комплексные исследования материалов на основе меди Cu-ZnO (нано), Cu-TiN (нано) стандартными методами механических испытаний в сочетании с металлографическими, электронномикроскопическими исследованиями с использованием энергодисперсионного и термического анализа позволили установить стабильные корреляционные связи между содержанием добавок наночастиц, параметрами микроструктуры и физико-механическими свойствами псевдосплавов. Предложены и обоснованы технологические приемы повышения однородности распределения модифицирующих добавок наночастиц ZnO и TiN по объему псевдосплава, исключаящие 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 обеспечивает возможность снижения керамической фазы в электроконтактных материалах (до 2,0% - 3% вместо 10-15% в сравнении с известными коммерческими). В результате сохраняются на достаточно высоком уровне основные свойства

характерные для матричного материала (меди) – тепло и электропроводность, и, одновременно, повышается общий уровень физико-механических (твёрдость, прочность, износостойкость) и эксплуатационных свойств композиционных псевдосплавов. Основные свойства композиционных материалов на основе меди: электросопротивление  $\rho$  (около  $0,025 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ ), прочность соединения с материалом контактодержателя ( $\sigma \sim 2 \text{ МПа}$ ), 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 - технологическое обеспечение машиностроительных производств» Сибирского федерального университета (СФУ), 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79, E-mail: [tms-mtf@rambler.ru/](mailto:tms-mtf@rambler.ru)

**Абкарян А. К.**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Машиностроение» Сибирского федерального университета (СФУ), 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79, E-mail: [abkaryan\\_artur@mail.ru](mailto:abkaryan_artur@mail.ru).

**Суровцев А. В.**, аспирант, кафедры «Конструкторско - технологическое обеспечение машиностроительных производств» Сибирского федерального университета (СФУ), 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79, E-mail: [tms-mtf@rambler.ru](mailto:tms-mtf@rambler.ru)

**Лепешев А.А.**, доктор физ.-мат. наук, профессор, Красноярский научный центр Сибирского отделения АН РФ, г. Красноярск, Академгородок 50/50, E-mail: [unesco@mail.ru](mailto:unesco@mail.ru)

*Yu.I. Gordeev, A.K. Abkaryan, A.V. Surovtsev, A. A. Lepashev*

***INVESTIGATION OF FEATURES OF STRUCTURE FORMATION AND PROPERTIES OF COPPER-BASED POWDER PSEUDOALLOYS MODIFIED BY ADDITIVES OF NANOPARTICLES ZnO AND TiN***

Multi-method investigation of copper-based materials Cu-ZnO (nano), Cu-TiN (nano) by standard methods of mechanical tests along with metallographic, electron-microscopic research using energy-dispersive and thermal analysis allowed to establish stable correlative relationships between the content of nanophase additives, microstructure parameters and mechanical-and-physical properties of pseudoalloys. The processing technologies have been suggested and justified to increase the distribution homogeneity of modifying additives ZnO and TiN over the volume of pseudoalloy, excluding their conglomeration. The novel original methods of introducing of nanoparticles to the matrix material in the form of ligature from Cu-Al-ZnO or copper powders coated by TiN nanoparticles are provided. High-surface area and reactive capacity of nanopowders provide the opportunity to decrease the ceramic phase in electrocontact materials (down to 2,0% - 3% instead of 10-15% compared with known commodity-based). In this way, general properties typical for matrix material (copper), i.e. heat and conductivity, are retained at significantly high level, 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. The main properties of the composite materials based on copper: the resistivity  $\rho$  (about 0,025 m $\Omega$  • m), solder connection with contact-strength material ( $\sigma \sim 2$  MPa). Through the ceramic phase dispersed inclusions, decreases electroerosion wear (2.5 times in comparison with conventional materials).

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

**Gordeev Yu. I.**, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor in Department of Designing Machinery Preproduction of Siberian Federal University (SFU), 660041, Krasnoyarsk, pr. Svobodniy, 79, E-mail: [tms-mtf@rambler.ru](mailto:tms-mtf@rambler.ru)

**Abkaryan A. K.**, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor in Department of Mechanical Engineering of Siberian Federal University (SFU), 660041, Krasnoyarsk, pr. Svobodniy, 79, E-mail: [abkaryan\\_artur@mail.ru](mailto:abkaryan_artur@mail.ru).

**Surovtsev A. V.**, Candidate for a Master's Degree in Department of Designing Machinery Preproduction of Siberian Federal University (SFU), 660041, Krasnoyarsk, pr. Svobodniy, 79, E-mail: [tms-mtf@rambler.ru](mailto:tms-mtf@rambler.ru)

**Lepeshev A. A.**, Doctor, professor, Krasnoyarsk Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Akademgorodok 50/50, Krasnoyarsk, Russian Federation, E-mail: [unesco@mail.ru](mailto:unesco@mail.ru)

## **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 требует 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 дисперсноупрочняющие, 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, т.к. они могут обеспечивать требуемый дополнительный эффект при пониженном количестве добавок к матричному материалу, не снижая его собственных характеристик.

Хорошо известно, что использование традиционных методов смешивания и консолидации приводит к увеличению начальных размеров и агломированию наночастиц и охрупчиванию матричного материала [15, 19, 20]. Поэтому, для получения материалов с повышенным уровнем свойств и однородным распределением изолированных наночастиц, необходимо уменьшить их химическое взаимодействие, агломерирование за счет альтернативных методов, например интенсивной пластической деформации, экструзии [1-5, 20].

Целью настоящей работы является 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 прессформах с жесткой матрицей при удельном давлении прессования  $P \leq 500$  МПа в таблетки с размерами  $\varnothing 10 \times 10$  мм., образцы электроконтактов КМК101020 (ТУ 16-685.020-85), контрольные штабики 5x10x50 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 удельном давлении  $P=800-1000$  МПа, после чего подвергали отжигу в вакууме при  $T=500\pm 20^\circ\text{C}$  для снятия остаточных напряжений. Исследования микроструктуры проводили в Центре коллективного пользования СФУ методами электронной микроскопии и энергодисперсионного микроанализа по спектрам характеристического рентгеновского излучения (ХРИ) на микроскопах JEOL JSM 6490LV, JEOL JSM 7001F («JEOL», Япония) с системой микроанализаторов Oxford Instruments, HITACHI TM 1000 («HITACHI», Япония) и оптическом микроскопе ZEISS Observer Z1m («Carl Zeiss», Германия). Интенсивность процессов уплотнения оценивалась 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 (ДЗНВА) проводились испытания электроконтактов по твердости, удельному электросопротивлению, интенсивность изнашивания (электроэрозионный износ) определялась по стандартам ISO и отраслевым методикам.

## **Результаты исследований и обсуждение**

При постановке целей и задач экспериментальных исследований исходили прежде всего из необходимости обеспечения стойкости к воздействию электрической дуги и предотвращению свариваемости при пиковых токовых нагрузках (включение - выключение). Анализ накопленных данных по результатам исследований показывает, что это может быть обеспечено за счет дугогасящих добавок керамических соединений ( $\text{CdO}$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{WC}$ ,  $\text{TiN}$ ) либо высокотемпературных металлов ( $\text{Mo}$ ,  $\text{W}$ ).

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

Электронномикроскопическое изучение микроструктуры, а так же данные других исследователей [15-18, 20] показывают, что превышение «пороговой» концентрации (около 8% масс) 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 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) со средним размером частиц  $d=8$  нм (рисунок 1а) [15, 24, 25] и композиционные слоистые порошки меди, плакированные наноразмерным слоем частиц нитрида титана, синтезированные в плазме дугового разряда низкого давления (рисунок 1б) [26].

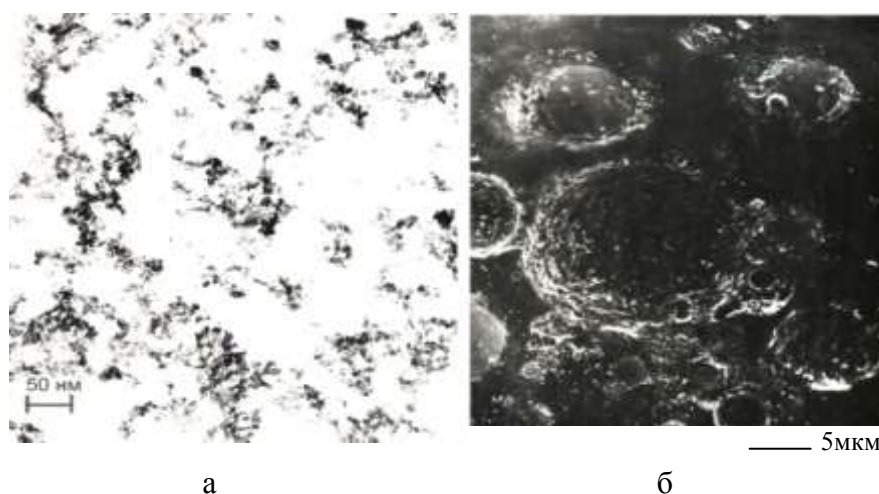


Рисунок 1 Микрофотографии нанопорошков-добавок к псевдосплавам: а - наночастицы ZnO, б - порошок меди покрытый «шубой» из наночастиц TiN.

**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 (Cu) со средними размерами частиц  $d=0,17$  мкм и площадью удельной поверхности  $S=3,9$  м<sup>2</sup>/г и алюминия (Al) -  $d=0,13$  мкм и площадью удельной поверхности  $S=16$  м<sup>2</sup>/г, полученных методом электровзрыва проволок [10].

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

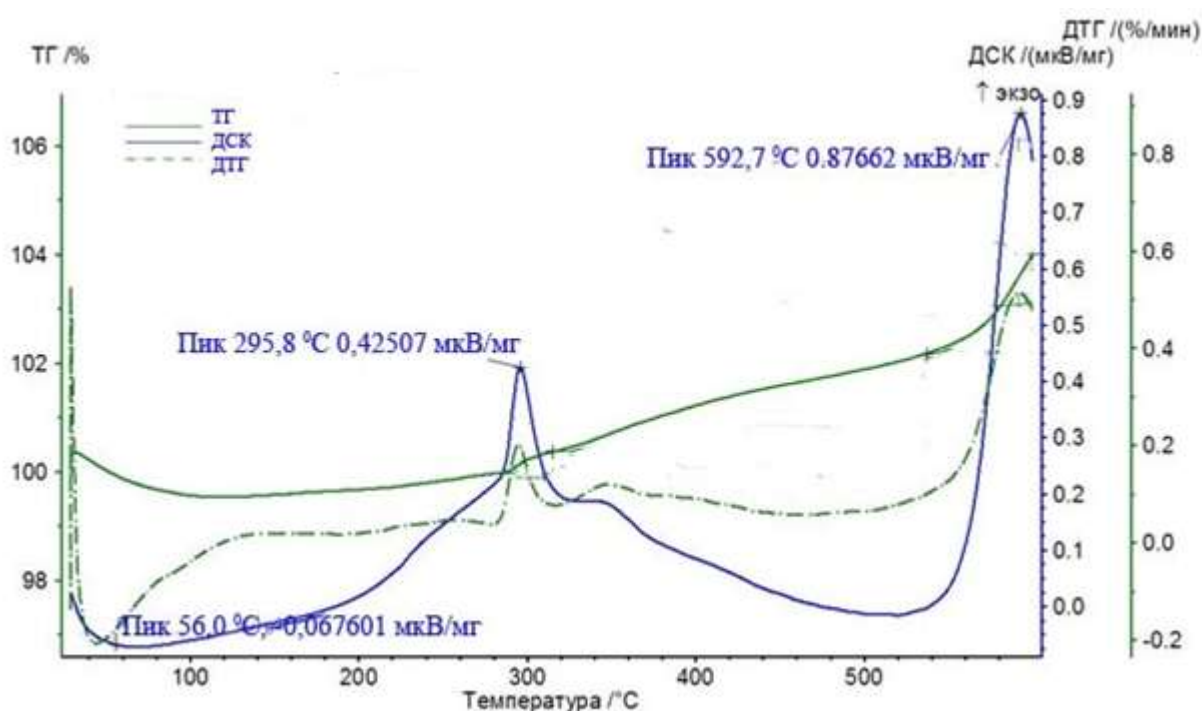
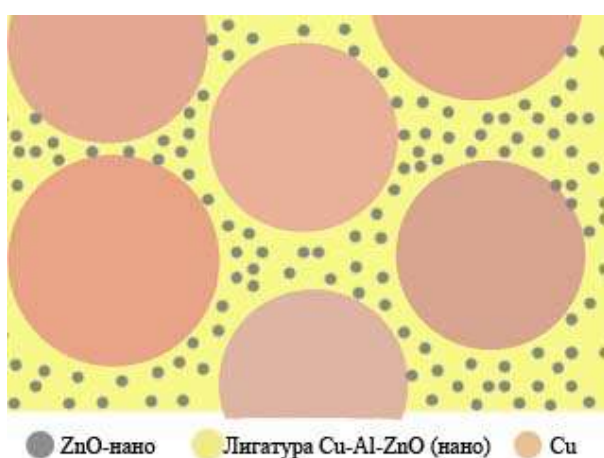


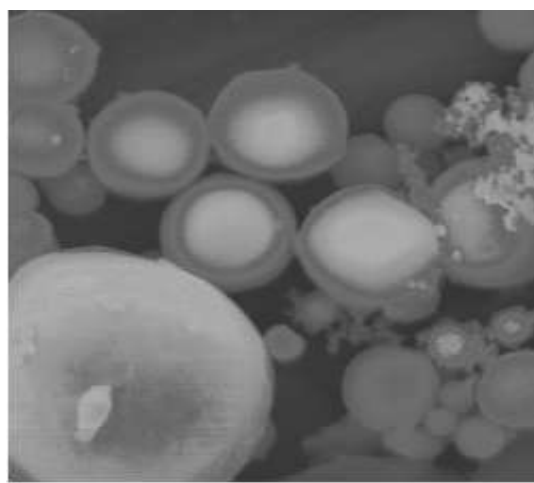
Рисунок 2 Результаты термоанализа смеси, состоящей из нанопорошков меди и алюминия.

При температуре около 548°С 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 окиси цинка. Количество добавок nano ZnO в лигатуре варьировалось в диапазоне от 6 до 12 % масс. В свою

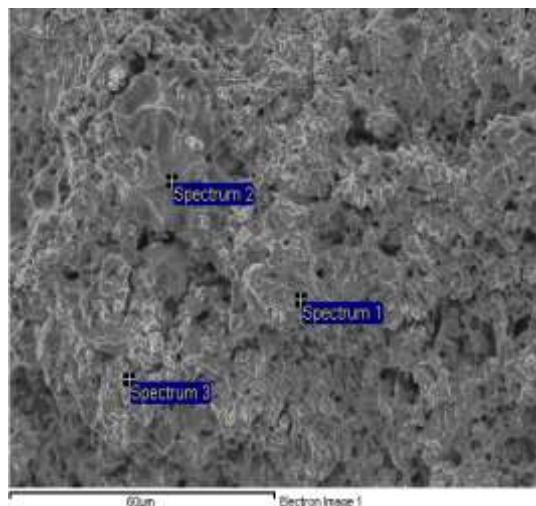
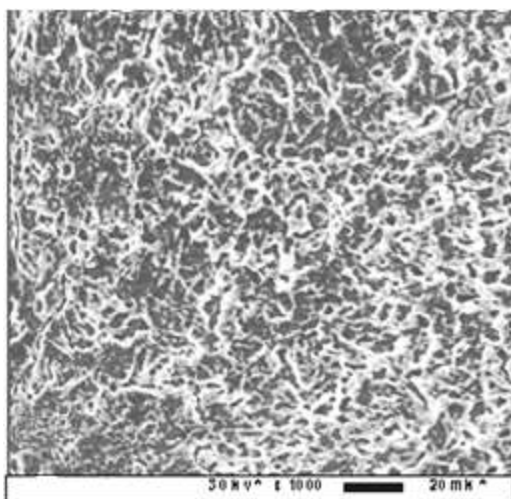
очередь, содержание лигатуры из порошков Cu-Al-ZnO нано в составе основного матричного материала меди составляет 1-5 % масс. Из совокупности данных, полученных методами ДТА, РФА и электронной микроскопии, следует, что интенсивности тепловыделения (от 875 до 2250 Дж/г) достаточно для образования в локальных зонах между матричными (микронными) зернами меди прослоек алюминиевой бронзы (рисунок 3). Саморазогрев лигатуры (Cu-Al-ZnO нано) и дальнейшая гомогенизация структуры композиционного псевдосплава при спекании (до температуры около 920°C) позволяет равномерно перераспределить дисперсные частицы ZnO по объему матричной меди (рисунок 3, 4).



а



10μm  
б



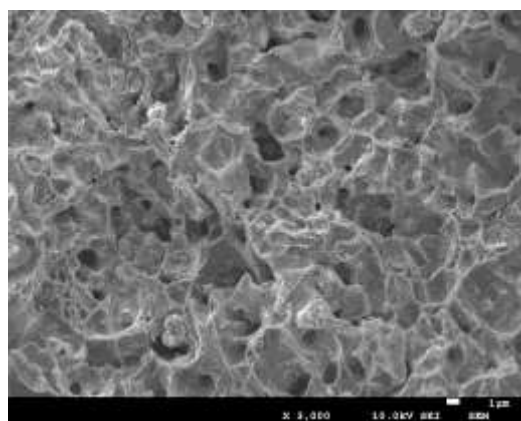
● - Cu, ○ - прослойка лигатур Cu-Al-  
ZnO нано  
в

Все результаты в весовых% Сайт 7 – Cu-Al					
Спектр	Zn	O	Al	Cu	Total
Спектр 1	1.98	2.72	2.33	92.97	100.00
Спектр 2	1.52	0.54	0.59	97.35	100.00
Спектр 3		1.52	1.51	96.97	100.00

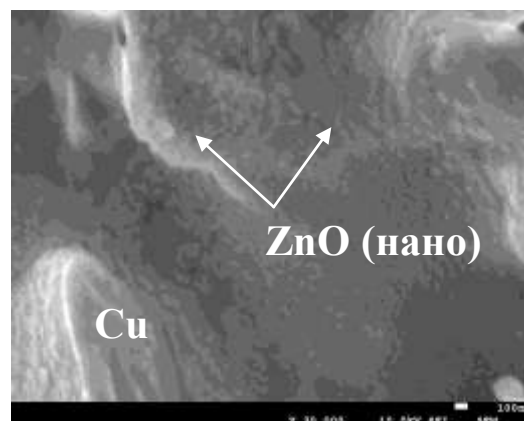
г

Рисунок 3. Формирование структуры псевдосплава на основе меди с добавками керамических наночастиц ZnO: а – схема распределения добавок наночастиц в прослойке алюминиевой бронзы; б - порошки лигатуры (Al-Cu); в – образование прослоек алюминиевой бронзы; г – включения наночастиц ZnO на поверхности излома

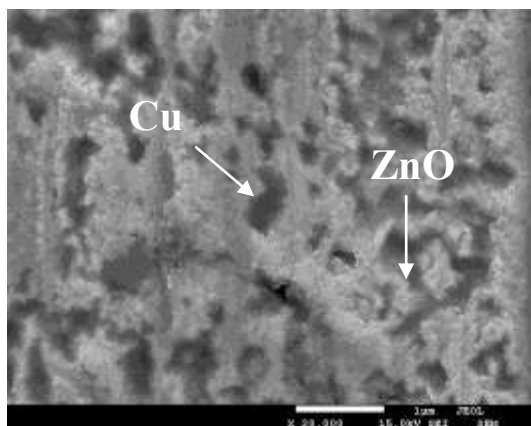
Характер распределения добавок наночастиц по объему псевдосплава иллюстрируется данными электронномикроскопического анализа – рисунок 4. Изучение распределения фаз и определение элементного состава проведено с использованием метода энергодисперсионного микроанализа по спектрам характеристического рентгеновского излучения (ХРИ) и с применением метода композиционного контраста. Результаты определения элементного состава в атомном соотношении приведены в таблице к рисунку 4д.



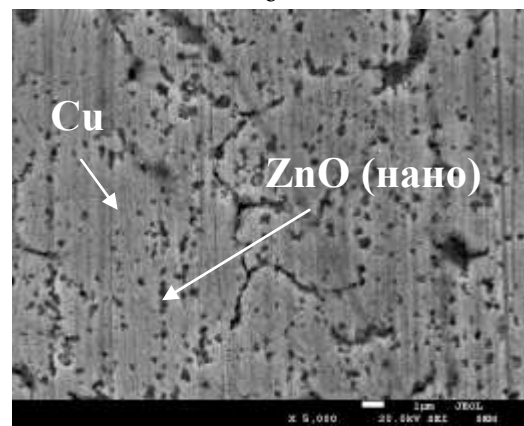
а



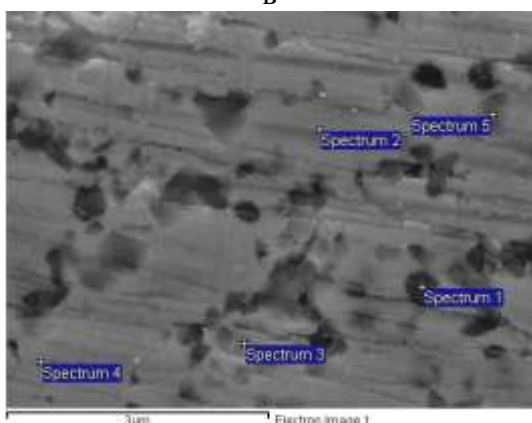
б



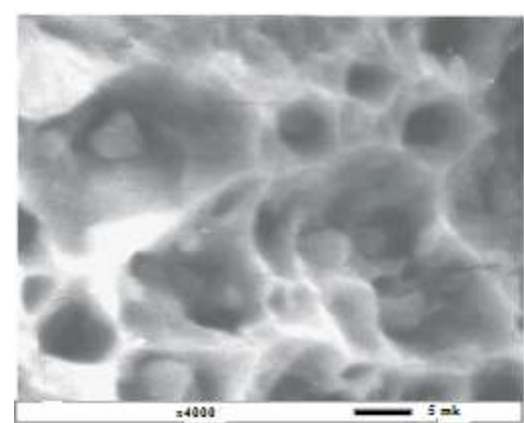
в



г

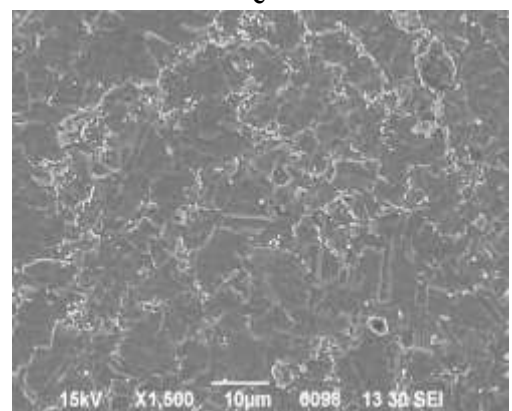


д



е

O, вес. %	Zn, вес. %	Cu, вес. %	Всего
12.12	29.67	58.21	100.00
	6.77	93.23	100.00
11.53	26.27	62.20	100.00
	2.17	97.83	100.00
5.14	15.12	79.74	100.00



ж

Рисунок 4. Распределение наночастиц ZnO по объему псевдосплава на основе меди: а, б – по излому; в, г, д – по поверхности; е – ямки дисперсноупрочняющих добавок ZnO на

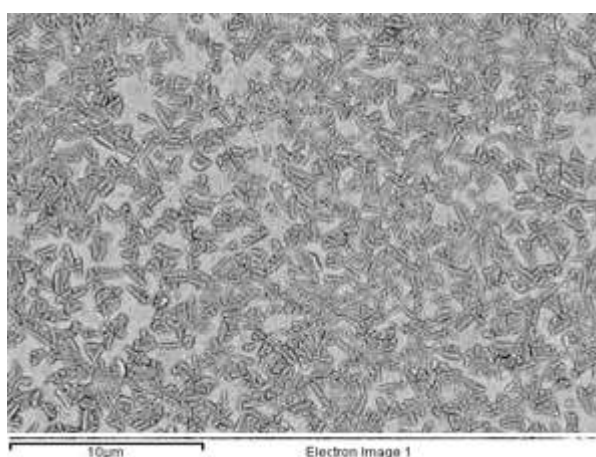
изломе; ж – характер распределения включений наночастиц по границам зерен меди

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 измерения микротвердости и снижением величины абразивного износа – таблица 1 (наряду с обеспечением дугогасящих свойств). Наночастицы распределены, как правило, по границам зерен матричного материала (меди) - рисунок 4ж но также и по материалу внутри зерен. Присутствуют фазы более крупных агрегатов с размерами 0,1–0,5 мкм образованных из наночастиц ZnO.

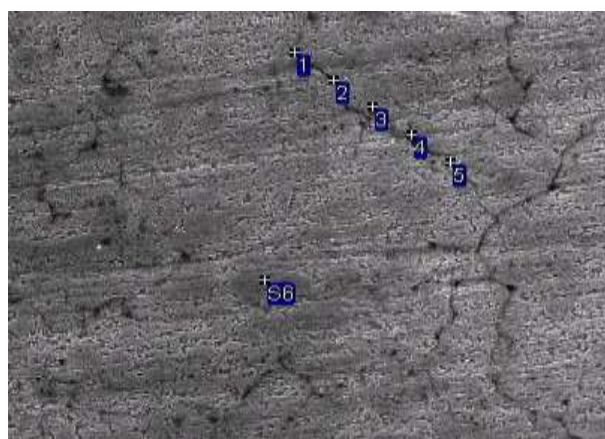
Однако, частичная агломерация наночастиц не снижает общего требуемого уровня свойств электроконтактного материала (сопоставимого со свойствами стандартных марок на основе серебра КМК-А10М (Ag-CdO)).

**Псевдосплавы Cu – TiN.** 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. также рис. 1б) вводились в состав смеси в виде дополнительной гранулированной фракции (лигатуры).

Объемное содержание лигатуры изменялось в диапазоне от 4 до 10% масс. от основного объема порошковой меди. Результаты изучения микроструктуры этой группы композиционных электроконтактных материалов с использованием компьютерных методов анализа изображений показали высокую степень однородности распределения фазовых составляющих по поверхности (объему) псевдосплава (рисунок 5а). Отличительной особенностью параметров структуры является достаточно регулярное равномерное распределение «цепочек» из наночастиц TiN по интерфейсным границам зерен меди.



а



Спектры	N, вес. %	O, вес. %	Ti, вес. %	Cu, вес. %
Суммарный спектр	0.16	0.92	0.47	98.45
LS 1	1.13		1.68	97.19
LS 2	0.53		0.59	98.87
LS 3				100.0
LS 4	1.92		1.24	96.84
LS 5	0.57	0.87	1.07	97.49
S6				100.0

б

Рисунок 5. Микроструктура контактных материалов на основе Cu-наноTiN: а - Cu-наноTiN; б – SEM микроструктура Cu-наноTiN x 3000

Исследования микроструктуры псевдосплавов Cu-наноTiN после доуплотнения показывают, что в процессе калибровки происходит частичное или полное разрушение хрупких границ (TiN) сформированных цепочками наночастиц. После повторного спекания формируется структура с дисперсноупрочняющими, несвязанными друг с другом включениями TiN (рисунок 5б). На рисунке 6 представлены результаты изучения основных свойств материалов Cu-наноTiN с различным содержанием керамической фазы по значениям удельного электросопротивления и коммутационного износа (который зависит от прочности и твердости матричного материала), которые показывают, что с увеличением концентрации наночастиц TiN величина относительного коммутационного износа изменяется немонотонно. При содержании керамической фазы (наночастиц) до 2,5% масс реализуется эффект дисперсного упрочнения, возрастает общая твердость и микротвердость композиционного материала за счет керамической фазы, соответственно снижается коммутационный износ ( $\epsilon$ ) (область 1, рисунок 6). Однако, по достижению критической пороговой концентрации добавок наночастиц (для этого материала – 5% масс.) возрастает степень их контактности, агломерирование до более крупных образований – материал охрупчивается, возрастает интенсивность износа ( $\epsilon$ ) (область 2, рисунок 6). Такие структурные метаморфозы объясняют также характер изменения величины удельного электросопротивления - с увеличением концентрации керамической фазы величина ( $\rho$ ) монотонно возрастает. Это достаточно



известный эффект, который подтверждается и результатами других исследований [2, 7].

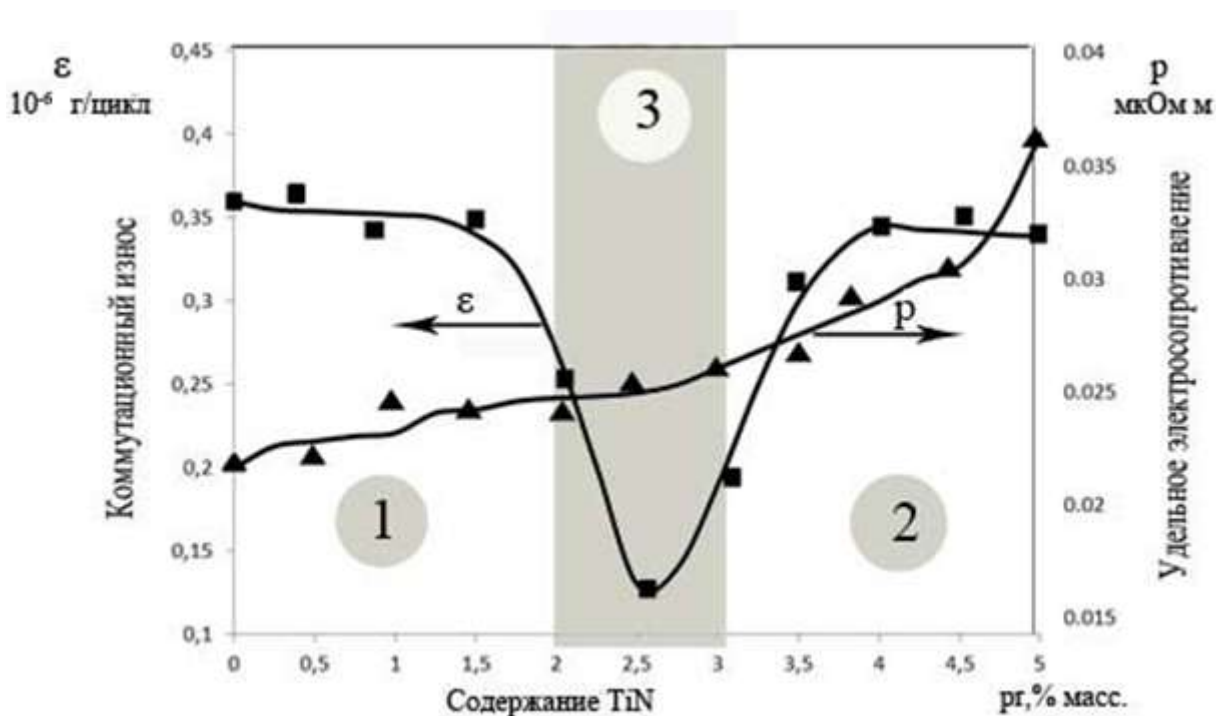


Рисунок 6 Зависимость коммутационного износа  $\epsilon$  и удельного сопротивления  $\rho$  от содержания TiN в материале

Можно заключить, что экспериментально установленная оптимальная область нанодобавок TiN к матричному материалу меди лежит в диапазоне от 2 – 3% масс. (область 3, рисунок 6), в котором 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 (таблица 1).

Проведенные эксплуатационные испытания электроконтактов на основе предложенных способов позволили определить оптимальные составы материалов контактной пары, которые обеспечивают допустимый уровень перегрева в условиях длительного включения (более 15 суток) – 65 °С, коммутационный износ в пределах -  $0,092 \cdot 10^{-6}$  г/цикл, удельное электросопротивление материалов контактной пары - 0,025 мкОм·м. Обеспечивается удовлетворительное сдувание дуги, размыкание контактной пары в условиях короткого замыкания (по результатам испытаний на предельную коммутационную способность). Результаты стендовых испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1

Составы и свойства исследованных электроконтактных материалов на основе меди

Образец №	Состав материала масс. %	Свойства					
		Плотность $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	Твердость HV	Удельное электро сопротивле ние $\rho$ , мкОм·м	Коммутаци онный износ, $\epsilon$ , $10^{-6}$ , г/цикл	Темпера тура на контакто держате ле, °С	Предел прочности, $\sigma_{\text{среза}}$ , МПа
1	Нитрид титана 0,4 Оксид цинка 2,5 Медь остальное	8,6	110	0,021	0,280	60	2,1
2	Нитрид титана 1,0 Оксид цинка 2,5 Медь остальное	8,6	110	0,022	0,310	73	2,0

3	Нитрид титана 2,5 Оксид цинка 2,5 Медь остальное	8,7	117	0,025	0,092	65	2,0
4	Нитрид титана 4,0 Оксид цинка 2,5 Медь остальное	8,6	120	0,027	0,340	78	1,8
5	Нитрид титана 5,0 Оксид цинка 2,5 Медь остальное	8,6	126	0,037	0,350	78	1,7

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 использования композиционных слоистых порошков «медь - нитрида титана» обеспечивают 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  $\rho$  (около 0,025 мкОм·м) и электропроводность, прочность паяного соединения с материалом контактодержателя ( $\sigma_{ср} \sim 2$  МПа) и, одновременно, за счет дисперсных включений керамической фазы снижается электроэрозионный износ (в 2,5 раза) в сравнении со стандартными материалами), обеспечивается 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. Справочное издание. М. Металлургия, 1981.
2. *Braunovic M., Konchits V. V., Myshkin N.K.* Electrical Contacts: Fundamentals, Applications, and Technology. London, New York: CRC Press, Teilorand Francis Gtoup. 2007.
3. *Holm H.* Electric Contacts. Berlin: Springer-Verlang. 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: *A Review Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)*. 2014. Vol. 27. N 5. P. 798–805.
6. Slade P. G. High Current Contacts: A review and tutorial: *Proceeding 21st International Conference on Electrical Contacts* (September 2002). Zurich, Switzerland: University of Zurich. 2002. P.413–424.
7. Ahn B.D., Kang H. S., Kim J. H. S. H. Jee, Y. S. Yoon, and D.-J. Kim, Synthesis and analysis of Ag-doped ZnO // *Journal of Applied Physics*. 2006. No 100. 093701
8. Dulin F.H, Rase D.E. Phase Equilibria in the System ZnO—TiO<sub>2</sub>. *J. Americ. Ceramic Societ.* 1960. Vol. 43. N 3. P. 125–131.
9. Findik F., Uzun H. *Materials and Design*. 2003. N 24, P. 489– 492.
10. Shubin A. A., Sidorak A. V., Ivanov V. V. Synthesis of complex oxides CdO-ZnO-SnO<sub>2</sub> for electrical contacts // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2014, Vol. 87. No. 3. P. 258-264.
11. R.Hemmi, Y. Yokomizu, and T.Matsumura. Anode-Fall and Cathode-Fall Voltages of Air Arc in Atmosphere between Silver Electrodes // *J. Phys. D: Appl. Phys*, 36, 1097-1106. 2003.
12. Leung C., Streicher E., Fitzgerald D. Welding behavior of Ag/SnO<sub>2</sub> contact material with microstructure and additive modifications: *Proceedings of the 50th*

*IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts.* (September 20-24, 2004) Seattle, U.S.A. 2004. P. 64-69.

13. *Gordeev Y.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 // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals.* 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. Series Journal of Physics Conf. series 803* (2017)012050

15. *Николаева Н.С., Иванов В.В., Шубин А.А., Сидорак А.В.* Электропроводность композита Ag/ZnO на основе химически осажденных смесей. // *Перспективные 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. Materials Today.* 2004. Vol. 6. P. 34-40

18. *Hahn Y-B.* Zinc oxide nanostructures and their applications // *Korean J. Chem. Eng.* 2011. Vol. 28. № 9. P. 1797-1813

19. *Andrievski R., Glazer A.* Strength of nanostructures. // *UFN.* 2009. 179: 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. Том 118. No9. С. 935–940
22. *Zeer G. M.* Investigation of the microstructure and properties of electrocontact silver-zinc oxide nanopowder material // The Physics of Metals and Metallography. 2012. Vol.113. No 9 P.902-906
23. *Gordeev Y.I., Adkaryan A.K., Binchurov A.V., Yasinsky V.B.* Design and investigation of Hard Metal Composites Modified by Nanoparticles. Advanced Material Research. Vol. 1040 (2014). P. 13-18.
24. *Коршунов А.В.* Размерные структурные эффекты в процессах окисления металлов: монография. Томск.: Изд-во Томский политехнический университет (ТПУ). 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 // Неорганические материалы. 2003. Vol. 39. No. 3. С. 337–341.

## REFERENCES

1. *Gnesin G.G.* Spechennye materialy dlya elektrotekhniki i elektroniki. Spravochnoe izdanie [Sintered materials for electrical engineering and electronics. Reference edition.] *M, Metallurgiya.* 1981.
2. *Braunovic M., Konchits V. V., Myshkin N.K.* Electrical Contacts: Fundamentals, Applications, and Technology. London, New York: CRC Press, Teilorand Francis Gtoup. 2007.
3. *Holm H.* Electric Contacts. *Berlin; Springer-Verlang.* 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: *A Review Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.).* 2014. Vol. 27. N 5. P. 798–805.
6. *Slade P. G.* High Current Contacts: A review and tutorial: *Proceeding 21st International Conference on Electrical Contacts* (September 2002). Zurich, Switzerland: University of Zurich. 2002. P.413–424.
7. *Ahn B.D., Kang H. S., Kim J. H. S. H. Jee, Y. S. Yoon, andD.-J. Kim,* Synthesis and analysis of Ag-doped ZnO // *Journal of Applied Physics.* 2006. No 100. 093701
8. *Dulin F.H, Rase D.E.* Phase Equilibria in the System ZnO—TiO<sub>2</sub>. *J. Americ. Ceramic Societ.* 1960. Vol. 43. N 3. P. 125–131.
9. *Findik F., Uzun H.* *Materials and Design.* 2003. N 24, P. 489– 492.



10. Shubin A. A., Sidorak A. V., Ivanov V. V. Synthesis of complex oxides CdO-ZnO-SnO<sub>2</sub> for electrical contacts. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2014, Vol. 87. No. 3. P. 258-264.
11. R.Hemmi, Y. Yokomizu, and T.Matsumura. Anode-Fall and Cathode-Fall Voltages of Air Arc in Atmosphere between Silver Electrodes. *J. Phys. D: Appl. Phys*, 36, 1097-1106. 2003.
12. Leung C., Streicher E., Fitzgerald D. Welding behavior of Ag/SnO<sub>2</sub> contact material with microstructure and additive modifications: *Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts*. (September 20-24, 2004) Seattle, U.S.A. 2004. P. 64-69.
13. Gordeev Y.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. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2012, Vol. 53. No. 4. P. 351-355.
14. Gordeev Yu I, Abkaryan A K, Zeer G M, Lapeshev A A, Zelenkova E G Effect of liquid-phase sintering as means of quality enhancement of pseudoalloys based on copper. *IOP Conf. Series Journal of Physics Conf. series* 803 (2017)012050
15. Nikolaeva N.S., Ivanov V.V., Shubin A.A., Sidorak A.V. Elektro-provodnost' kompozita Ag/ZnO na osnove khimicheski osazhdennykh smesei. [The conductivity

of the composite Ag / ZnO-based chemically precipitated mixtures]. *Perspektivnye materialy*. 2013. No. 8. C. 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. Materials Today*. 2004. Vol. 6. P. 34-40

18. Hahn Y-B. Zinc oxide nanostructures and their applications. *Korean J. Chem. Eng.* 2011. Vol. 28. № 9. P. 1797-1813

19. Andrievski R., Glazer A. Strength of nanostructures. *UFN*. 2009. 179: 4, P.337-358.

20. Kolobov Yu.R., Valiev R.Z. Zernogranichnaya diffuziya i svoistva 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 uprochnennyi nikelom, 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. No9. P. 935–940

22. Zeer G. M. Investigation of the microstructure and properties of electrocontact silver-zinc oxide nanopowder material. *The Physics of Metals and Metallography*. 2012. Vol.113. No 9 P.902-906

23. Gordeev Y.I., Adkaryan A.K., Binchurov A.V., Yasinsky V.B. Design and investigation of Hard Metal Composites Modified by Nanoparticles. *Advanced Material Research*. Vol. 1040 (2014). P. 13-18.
24. Korshunov A.V. Razmernye strukturnye efekty v protsessakh okisleniya metallov: monografiya. monografiya [Dimensional structural effects in the metal oxidation process: monograph]. Tomsk.: *Izd-vo Tomskii politekhnicheskii universitet (TPU)*. 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 goreniya 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. Vliyanie davleniya gazovoi smesi na svoistva 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.