

06

Электроконтактный материал на основе серебра, дисперсноупроченный оксидами цинка, олова и титана

© Г.М. Зеер,¹ Е.Г. Зеленкова,¹ А.В. Сидорак,² В.В. Белецкий,¹ С.В. Николаев,¹ В.В. Колот,¹ М.Ю. Кучинский¹

¹Сибирский федеральный университет,
660041 Красноярск, Россия

²ОАО „Красцветмет“,
660027 Красноярск, Россия
e-mail: g-zeer@mail.ru

Поступило в Редакцию 27 июня 2018 г.

В окончательной редакции 18 февраля 2020 г.

Принято к публикации 19 февраля 2020 г.

Получен новый электроконтактный материал на основе серебра, дисперсноупроченный нанопорошками оксидов цинка, олова и титана. Методами электронной микроскопии и энергодисперсионного микроанализа исследованы микроструктура и элементный состав фаз, формирующихся как при твердофазном спекании, так и при электроэрозионных испытаниях. В процессе лабораторных испытаний определен электроэрозионный износ и рассчитано переходное электросопротивление. Разработанный электроконтактный материал показал физико-механические и эксплуатационные свойства, подобные свойствам промышленного контакта, полученного с использованием токсичного оксида кадмия.

Ключевые слова: нанопорошки, электроконтактные материалы, микроструктура, электроэрозионный износ.

DOI: 10.21883/JTF.2020.08.49540.294-18

Введение

Электроконтактные материалы должны сочетать такие физико-механические и эксплуатационные свойства, как эрозионная и коррозионная стойкость, твердость, высокие электро- и теплопроводность, низкое переходное электросопротивление, возникающее при замыкании контактов [1,2]. Этим требованиям удовлетворяют полученные методом порошковой металлургии композиционные электроконтактные материалы на основе серебра или меди с дисперсноупрочняющими и дугогасящими добавками порошков металлов, оксидов, боридов, карбидов металлов и их различных сочетаний в составе исходной смеси [3–18]. При создании бескадмиевых материалов для электроконтактов исследуется влияние на физико-механические и эксплуатационные свойства таких добавок. Распространенной дугогасящей добавкой в составе промышленных электроконтактных материалов является оксид кадмия [2], однако он обладает высокой летучестью и токсичностью. Поэтому существует необходимость замены его на другие компоненты, при этом альтернативой могут выступать оксид цинка [3,4,6,7,18,19] и оксид олова [9–15], которые имеют подобные физико-химические свойства. Кроме того, в настоящее время исследуется возможность использования и изучаются свойства электроконтактных материалов с такими дисперсноупрочняющими и дугогасящими добавками, как сочетание оксида олова или оксида цинка с другими компонентами, например, Ti, Hg, Bi, Se, In₂O₃ [1,2,13–17].

Износ контактов вследствие массопереноса, испарения и разбрызгивания материала при размыкании электрической цепи (дуговая эрозия) обусловлен дуговым разрядом и является главным фактором, определяющим качество электроконтактного материала. Дуговая эрозия сопровождается процессами взаимодействия твердого и жидкого металла с компонентами атмосферы и плазмой дуги с образованием оксидов и других плохопроводящих соединений. Механическое взаимодействие поверхностей контактов осуществляется на отдельных участках, от площади которых и наличия поверхностных пленок в значительной степени зависит переходное электросопротивление. Повышение переходного электросопротивления в сочетании с дугой, возникающей при размыкании контактов, вызывает их разогрев в отдельных точках поверхности, вследствие чего происходит рекристаллизация и разупрочнение материалов, формируется рабочий слой с измененной микроструктурой и составом фаз [2].

Повышение надежности и долговечности контактов может быть достигнуто уменьшением количества керамической составляющей. В частности, применение добавок оксидов в виде нанопорошков позволит уменьшить их весовое количество, повысить дисперсность оксидных фаз в структуре материала, при этом увеличить прочность и твердость матричного материала и сохранить электропроводность практически на уровне чистого серебра. Так как все свойства электроконтактных материалов структурно чувствительны, то при разработке новых составов необходимо учитывать влияние размеров и равномерности распределения компонентов в порошковой смеси, наличия и размеров пор и формирующихся в

Таблица 1. Состав и свойства электроконтактных материалов

Обозначение	Содержание элемента, wt.%					Пористость образцов, %	Микро твердость, МПа	Переходное электросопротивление, Ω	Электроэрозионный износ, g/cycle
	Ag	ZnO	TiO ₂	SnO ₂	CdO				
Z1	97.9	1	0.1	1	–	5.8	27	0.046	0.0124
Z2	96.9	2	0.1	1	–	4.7	29	0.046	0.0061
Z3	95.9	3	0.1	1	–	5.5	33	0.048	0.0132
Z	98	2	–	–	–	2.5	21	0.043	0.0288
S	98	–	–	2	–	5.4	20	0.043	0.0193
SZ	98	1	–	1	–	4.8	23	0.044	0.0211
СОК-12	88	–	–	–	12	2.5	44	0.047	0.0211

структуре спеченного компакта при твердофазном спекании фаз на физико-механические и эксплуатационные свойства [19,20]. Целью настоящей работы является исследование эффективности введения в состав бескадмиевого электроконтактного материала на основе серебра комплексной дугогасящей и дисперсно-упрочняющей добавки, состоящей из нанопорошков оксидов цинка, олова и титана.

Объекты и методики исследований

Для изготовления образцов использовали порошок Ag и нанопорошки SnO₂, TiO₂, ZnO. Как было показано в наших предыдущих работах [4,21], порошок серебра имеет средний размер частиц $d_{av} \approx 5 \pm 3 \mu\text{m}$, нанопорошки оксида олова — $70 \pm 10 \text{ nm}$, оксида титана — $20 \pm 5 \text{ nm}$ и оксида цинка $8 \pm 2 \text{ nm}$.

Для получения однородной смеси порошки смешивали в течение 10 min твердосплавными шарами в вибрационной мельнице RETSCH MM 400. Полученную смесь прессовали в жесткой матрице при давлении 300 МПа в образцы с размерами: диаметр 8 mm, высота 3 mm. Спекание проводили в муфельной печи DAHAN FH-05 на воздухе при температуре 840°C в течение 2 h. Спеченные образцы для повышения плотности допрессовывали при давлении 1000 МПа и для снятия остаточных напряжений отжигали при температуре 500°C в течение 1 h.

Микроструктуру и элементный состав образцов исследовали методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного микроанализа с помощью микроскопа JEOL JSM-7001F с системой микроанализаторов Oxford Instruments. Плотность определяли методом гидростатического взвешивания. Микротвердость измеряли вдавливанием четырехгранной алмазной пирамиды с квадратным основанием на приборе ПМТ-3, нагрузка на индентор составляла 0.02 N. Испытания на электроэрозионный износ и измерение переходного сопротивления проводили на специальном лабораторном стенде при переменном напряжении на контактах —

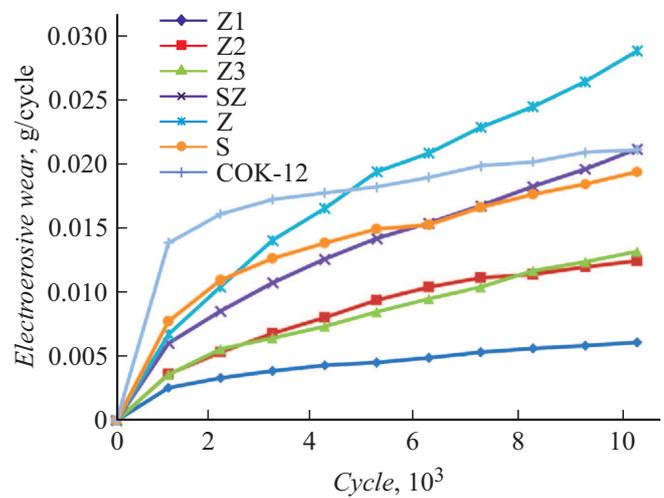


Рис. 1. Электроэрозионный износ разработанных бескадмиевых электроконтактных материалов на основе серебра в сравнении с промышленными образцами СОК-12.

380 V, частоте 50 Hz, переменном токе — 20 А и общем числе циклов „включение–выключение“, равном 10 000 [22]. Износ оценивали измерением массы контактных элементов с держателями на аналитических весах Mettler Toledo AB204-S/Fast до и после испытаний через 1000 циклов. Переходное сопротивление измеряли на 25-м замыкании электроконтактов в течение 10 s.

Результаты и обсуждение

В качестве дугогасящих и дисперсноупрочняющих добавок в электроконтактные материалы на основе серебра вводили нанопорошки оксида цинка, оксида олова, а также комплексную добавку, состоящую из нанопорошков оксидов цинка, олова и титана [23–28]. Использование нанопорошков позволяет уменьшить весовое количество оксидов в составе образцов в 3–4 раза, что снижает их влияние на электропроводность образца в целом.

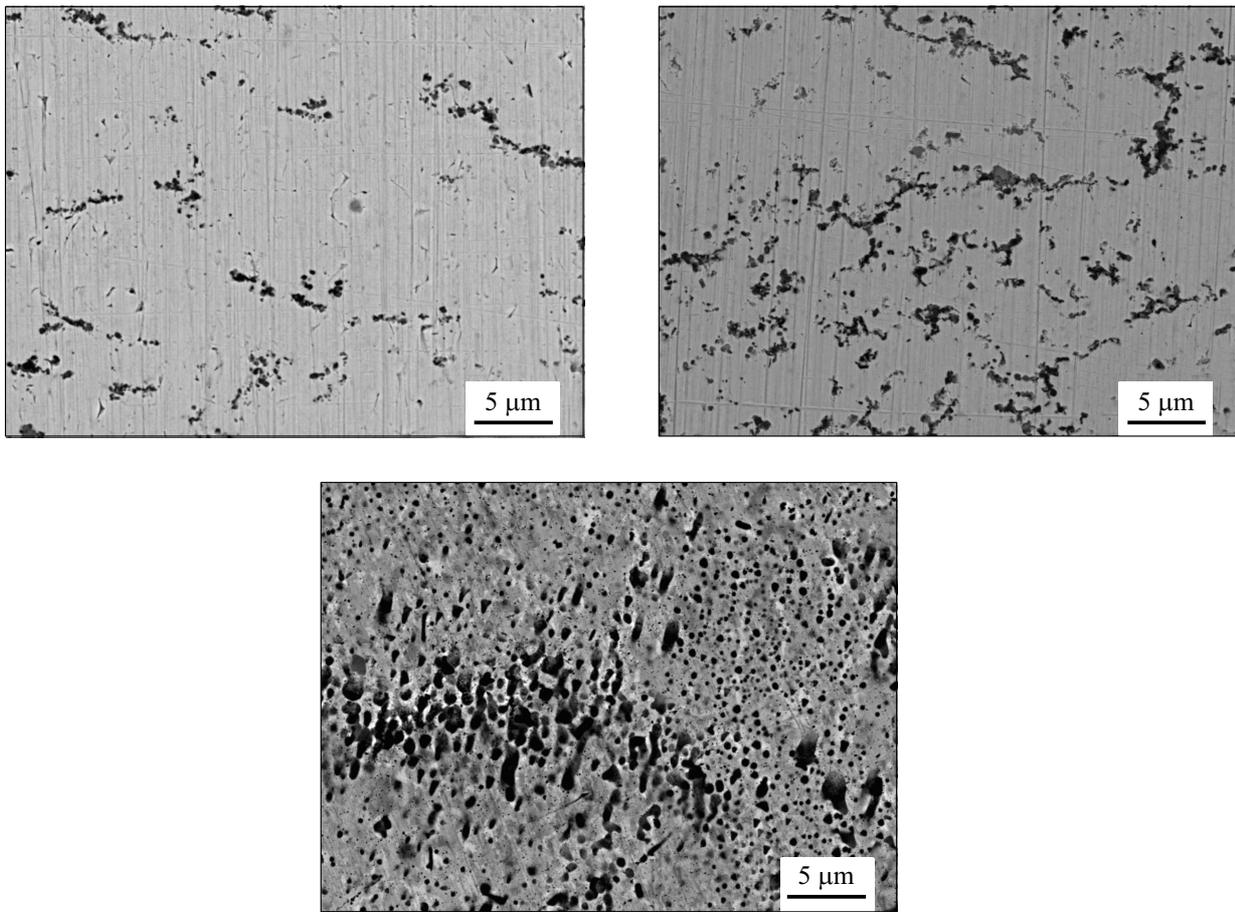


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение микроструктуры спеченных образцов: *a* — Z1; *b* — Z3; *c* — СОК-12.

Составы разрабатываемых электроконтактных материалов приведены в табл. 1. При применении комплексной добавки в процессе спекания образцов контактов происходит твердофазное взаимодействие оксидов олова и цинка, а также оксидов титана и цинка в соответствии с диаграммами фазового состояния с образованием новых фаз. Как было показано нами ранее методом РФА [26], результаты взаимодействия становятся заметными после изотермической выдержки уже при $T = 800^\circ\text{C}$ — оксиды титана и цинка взаимодействуют с образованием мета- (ZnTiO_3) и орто- $(\text{Zn}_2\text{TiO}_4)$ титаната цинка, оксиды ZnO и SnO_2 образуют ZnSnO_3 . Кроме того, остается некоторое количество отдельных агломератов ZnO и TiO_2 вследствие неравномерного распределения оксидов при смешивании порошков серебра и нанопорошков оксидов.

Микроструктура, элементный состав фаз спеченных образцов, физико-механические свойства образцов разработанных составов исследованы в сравнении со свойствами и микроструктурой промышленного электроконтакта СОК-12, результаты представлены в табл. 1. В составе СОК-12 в качестве дугогасящей и дисперсноупрочняющей составляющей содержится 12 wt.% токсичного оксида кадмия.

Испытания на эрозионный износ промышленного электроконтакта и разработанных электроконтактных материалов, проведенные в одинаковых лабораторных условиях, показали, что состав Z обладает небольшим превышением износа по сравнению с промышленным образцом СОК-12, образцы составов Z2, Z3, Z, S, SZ показали сопоставимую с промышленным образцом СОК-12 электроэрозионную стойкость. Минимальный электроэрозионный износ (почти в 3.5 раза меньше в сравнении с промышленным СОК-12) показали образцы состава Z2 (табл. 1, рис. 1).

Анализ полученных результатов показал, что с повышением содержания оксидной фазы незначительно и нелинейно увеличивается микротвердость вследствие наличия оксидов, обладающих более высокой твердостью, чем серебро, однако она остается существенно меньше микротвердости СОК-12, так как содержание оксидов в нем в 3–6 раз больше. Переходное сопротивление в зависимости от состава практически не изменяется, что подтверждается такими постоянными и контролируемыми параметрами, как усилие прижима, форма и состояние соприкасающихся поверхностей.

Электронно-микроскопические изображения типичной микроструктуры спеченных электроконтактных образ-

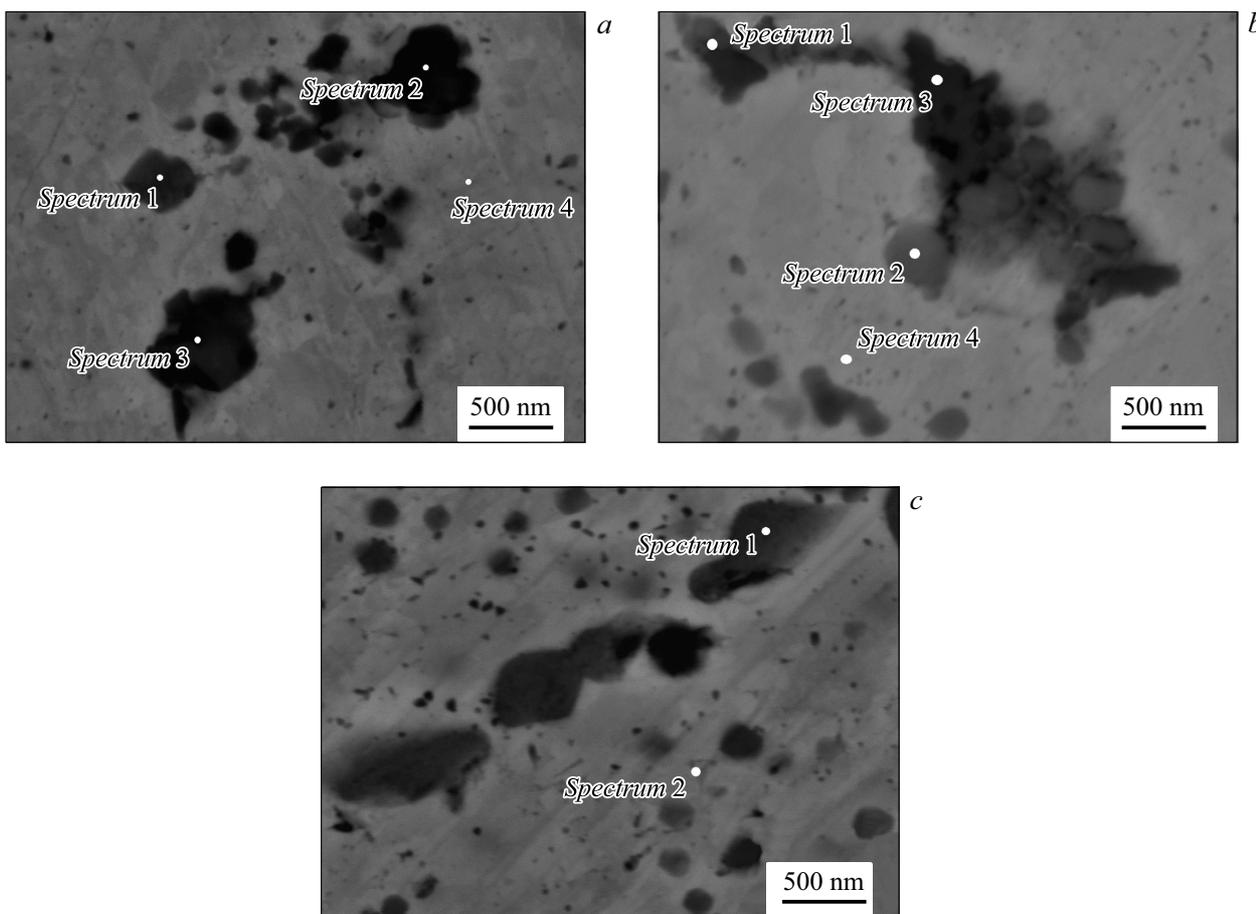


Рис. 3. Электронно-микроскопические изображения микроструктуры спеченных образцов: *a* — Z2; *b* — ZS; *c* — СОК-12. Точками отмечены области проведения энергодисперсионного микроанализа.

цов, полученные с применением метода композиционного контраста, представлены на рис. 2, *a, b*. Анализ микроструктуры показал, что оксидные включения (зерна темно-серого цвета) размером от $0.3 \pm 0.1 \mu\text{m}$ равномерно распределены по границам зерен серебра (светло-серого цвета) размером от $15 \pm 5 \mu\text{m}$. С увеличением содержания оксидов в составе образца растет размер отдельных оксидных включений, они выстраиваются в более длинные цепочки, не образующие сплошного каркаса (рис. 2, *a, b*).

В серебряной матрице промышленного электроконтакта СОК-12 включения оксида кадмия представлены двумя типами: 1 — округлые включения размером около $0.5 \mu\text{m}$; 2 — включения вытянутой формы, имеющие размеры $1-3 \mu\text{m}$ (рис. 2, *c*). В структуре образцов разработанных составов размер оксидных включений находится в диапазоне от 0.1 до $0.5 \mu\text{m}$ (рис. 2, *a, b*), тогда как в структуре СОК-12 оксидные включения крупнее и достигают $3 \mu\text{m}$. Пористость спеченных образцов в зависимости от состава изменяется, однако ее величина незначительна, что объясняется небольшим количеством добавок нанопорошков и оптимально подобранным технологическим режимом изготовления образцов.

Таблица 2. Элементный состав фаз спеченных образцов электроконтактов (рис. 3)

Образец	Спектр	Содержание химического элемента, at.%					
		O	Ti	Zn	Sn	Cd	Ag
Z2	1	45.1	1.1	25.7	1.9	—	26.1
	2	45.6	0.7	28.9	—	—	24.8
	3	55.2	0.7	11.7	6.3	—	26.1
	4	—	—	—	—	—	100
ZS	1	40.7	—	21.2	2.9	—	35.2
	2	28.5	—	—	5.4	—	66.0
	3	44.9	—	26.9	2.1	—	26.1
	4	—	—	—	—	—	100
СОК-12	1	40.2	—	—	—	31.3	28.2
	2	—	—	—	—	—	100

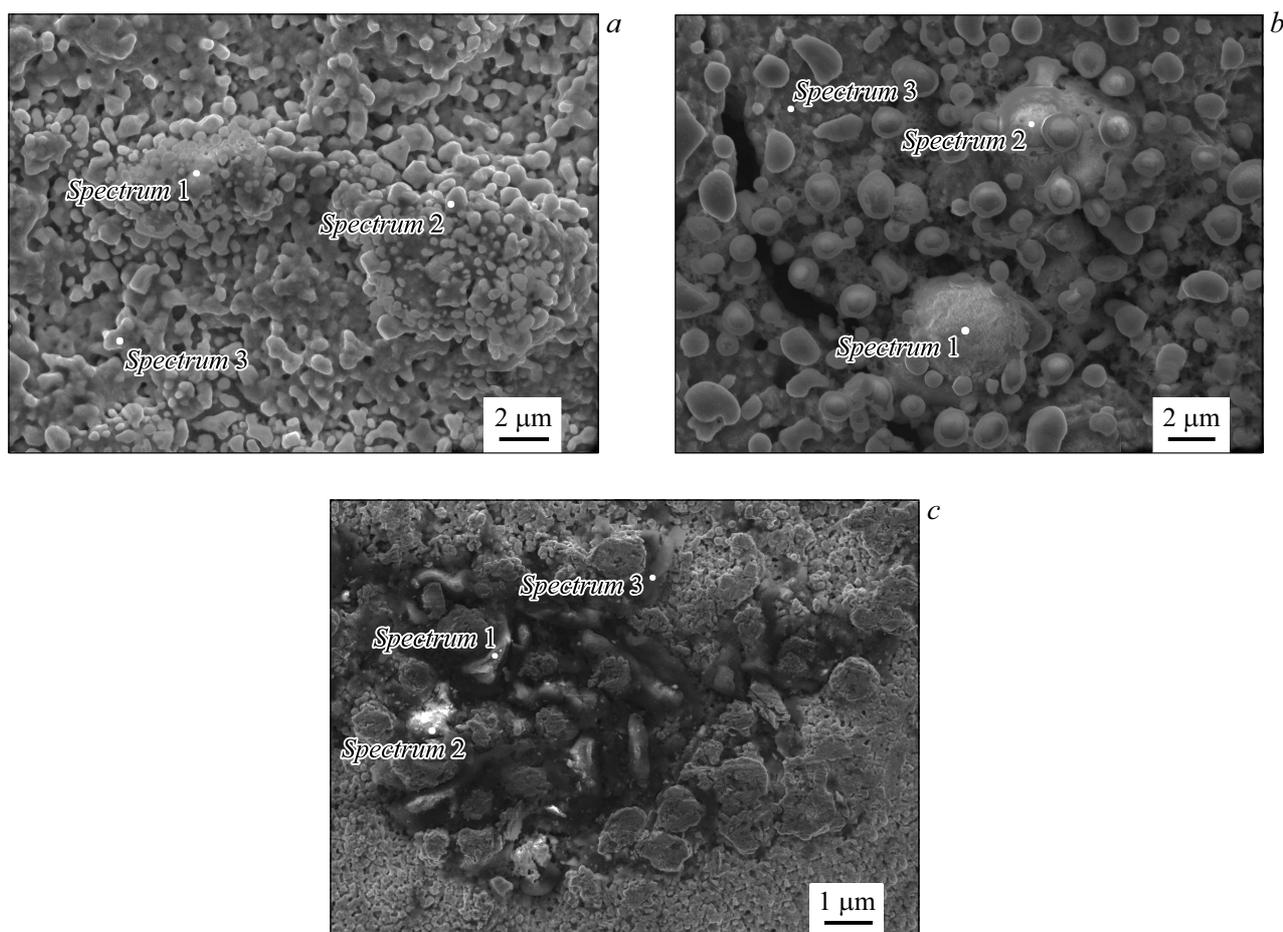


Рис. 4. Электронно-микроскопические изображения рабочей поверхности образцов: *a* — Z2; *b* — ZS; *c* — СОК-12. Точками отмечены области проведения энергодисперсионного микроанализа.

Таблица 3. Элементный состав фаз рабочей поверхности электроконтактов после испытаний (рис. 4)

Образец	Спектр	Содержание химического элемента, at.%										
		O	Ti	Zn	Cd	Ag	Sn	Si	Na	C	S	K
Z2	1	40.3	–	4.6	–	53.7	–	1.36	–	–	–	–
	2	16.1	–	–	–	83.9	–	–	–	–	–	–
	3	13.5	–	2.4	–	84.1	–	–	–	–	–	–
ZS	1	16.6	–	2.0	–	81.4	–	–	–	–	–	–
	2	11.1	–	–	–	88.9	–	–	–	–	–	–
	3	18.5	–	–	–	78.2	–	–	–	–	–	–
СОК-12	1	17.5	–	–	–	25.6	–	–	–	55.8	0.5	0.5
	2	51.3	–	–	35.90	–	–	–	–	–	0.4	12.8
	3	20.5	–	–	3.77	9.2	–	–	–	66.1	–	–
	4	26.1	–	–	12.80	61.1	–	–	–	–	–	–

Для определения состава фаз, сформировавшихся в процессе твердофазного спекания, выполнен энергодисперсионный микроанализ. На рис. 3 представлены типичные электронно-микроскопические изображения образцов СОК-12, Z2, и ZS, полученные в композиционном контрасте, с зонами проведения микроанализа. В образцах Z2 обнаружены O, Sn, Zn, Ti (образец Z2, рис. 3, *a*; табл. 2, спектры 1–4). Анализ соотношения химических элементов (в at.%) позволяет предположить в структуре образцов наличие дугогасящих и дисперсноупрочняющих фаз — ZnO, SnO₂, ZnTiO₃, Zn₂TiO₄, ZnSnO₃. Анализ соотношения химических элементов (Ag, O, Sn, Zn — в at.%) фаз в структуре образцов ZS показал наличие дугогасящих и дисперсноупрочняющих фаз ZnO, SnO₂ и ZnSnO₃ (рис. 3, *b*, табл. 2, спектры 1–3; спектр 4 получен на серебряной матрице). Микроструктура образца СОК-12 состоит из матричного материала — Ag и включений дугогасящего CdO (рис. 3, *c*, табл. 2, спектры 1, 2).

Спеченные образцы прошли испытания на электроэрозионный износ, после чего были исследованы элементный состав и микроструктура рабочей поверхности

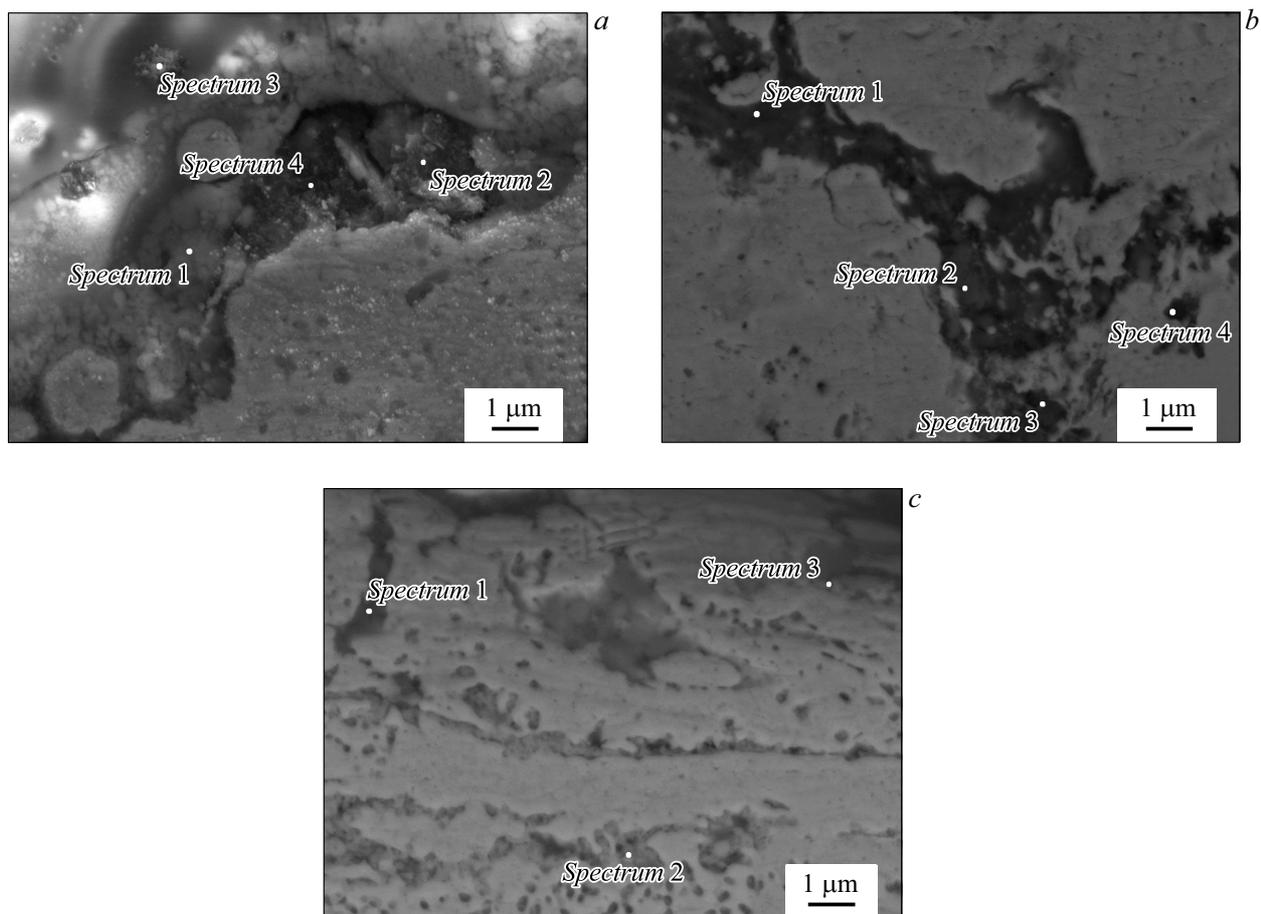


Рис. 5. Электронно-микроскопические изображения поперечного сечения рабочей поверхности образцов: *a* — Z2; *b* — ZS; *c* — СОК-12. Точками отмечены области проведения энергодисперсионного микроанализа.

в двух плоскостях: вид сверху (рис. 4) и поперечное сечение (рис. 5).

При включении–выключении контактов возникает электрическая дуга; происходящие под действием дугового разряда процессы на рабочих поверхностях контактов обусловлены в основном тепловым воздействием, приводящим к расплавлению и окислению материала на рабочей поверхности, а также его испарению, разбрызгиванию и массопереносу. При размыкании в месте плавления идет кристаллизация, появляются выступы и впадины округлой формы (рис. 4), микротрещины (рис. 4, *b*, рис. 5, *a*), поры (рис. 4, *a*, *b*). На рабочей поверхности контактов всех составов выявлены участки с исходной структурой, имеющие размеры порядка 100–300 μm. В структуре поперечного сечения образцов всех составов обнаружены локальные трещины, расположенные параллельно к рабочей поверхности контакта, также определена толщина рабочего слоя, она после 10 000 циклов „замыкание–размыкание“ достигает размеров $30 \pm 10 \mu\text{m}$. Анализ соотношения элементов (в at.%), обнаруженных в отдельных фазах, свидетельствует о том, что как на поверхности, так и по сечению

рабочего слоя присутствуют дисперсноупрочняющие и дугогасящие фазы — ZnO, SnO₂, Zn₂TiO₄, ZnSnO₃.

Серебро — идеальный материал для контактов, но оно склонно к сульфидизации. Образовавшиеся в процессе работы контактов включения дисперсные фазы Ag₂S ухудшают работу контактов, снижая прочность и электропроводность, поэтому особое внимание уделено составу фаз, сформировавшихся в процессе испытаний контактов. Элементный состав фаз рабочей поверхности образцов Z1 (максимальные свойства), ZS (минимальные свойства), СОК-12 (промышленный контакт для сравнения) представлен в табл. 3, 4. В рабочем слое СОК-12 обнаружены Ag, O, Ti, Zn, Sn. Кроме того, в рабочем слое СОК-12 (табл. 4, спектр 3) и Z2 (табл. 4, спектр 4) обнаружены в небольшом количестве Si, C, S, K. Эти химические элементы появляются в составе фаз в результате взаимодействия окружающей среды и компонентов материала контакта при высокотемпературном воздействии электрической дуги, например, Ag₂S. Как свидетельствуют литературные данные, эти фазы оказывают отрицательное влияние на электроэрозионный износ электроконтакта в процессе дальнейшей

Таблица 4. Элементный состав фаз поперечного сечения рабочей поверхности электроконтактов после электроэрозионных испытаний (рис. 5)

Образец	Спектр	Содержание химического элемента, at. %									
		O	Ti	Zn	Cd	Ag	Sn	Si	P	S	K
Z2	157.7	0.3	13.9	–	26.7	–	1.5	–	–	–	–
	2	56.71	–	10.9	–	20.2	9.27	2.9	–	–	–
	3	52.9	–	9.90	–	24.9	7.03	5.3	–	–	–
	4	54.9	–	12.4	–	25.3	3.24	1.9	–	2.3	–
ZS	1	67.4	–	13.7	–	7.6	9.54	1.3	–	–	–
	2	65.4	–	13.6	–	12.0	7.72	1.4	–	–	–
	3	61.1	–	11.4	–	15.6	6.92	1.0	–	–	–
	4	53.2	–	27.3	–	16.1	3.37	–	–	–	–
СОК-12	1	51.4	–	–	38.3	10.4	–	–	–	–	–
	2	–	–	–	34.7	45.4	–	–	14.5	–	5.4
	3	16.0	–	–	9.3	72.2	–	–	–	–	2.5

эксплуатации. Однако их количество незначительно и, следовательно, их влияние не существенно.

Заключение

Получены образцы электроконтактных материалов на основе серебра, дисперсноупрочненных комплексными дугогасящими добавками, состоящими из нанопорошков ZnO, SnO₂, TiO₂. Анализ электронно-микроскопических изображений и данных локального элементного состава позволил сделать вывод, что в образцах в результате твердофазного спекания в серебряной матрице формируются следующие фазы: ZnTiO₃, Zn₂TiO₄, ZnSnO₃.

Определено, что в процессе испытаний происходит образование сульфидных фаз как в глубине рабочего слоя, так и на поверхности электроконтактов, однако их количество незначительно, что практически не ухудшает дугогасящие свойства.

Полученные электроконтактные материалы имеют низкий электроэрозионный износ, что косвенно подтверждает дисперсно-упрочняющие и дугогасящие свойства предложенной комплексной добавки, состоящей из нанопорошков оксидов цинка, титана и олова.

Анализ результатов испытаний промышленного электроконтакта и разработанных электроконтактных материалов, проведенных в одинаковых лабораторных условиях, показал, что разработанный электроконтактный материал, в составе которого 3.1 wt.% керамической составляющей (2 wt.% ZnO, 1 wt.% SnO₂ и 0.1 wt.% TiO₂), имеет более низкий электроэрозионный износ, чем промышленный, в составе которого содержится 12 wt.% токсичного оксида кадмия.

Таким образом, показано, что введение в состав бескадмиевого электроконтактного материала на основе серебра комплексной дугогасящей и дисперсноупрочняющей добавки, состоящей из нанопорошков оксидов цинка, олова и титана, является эффективным.

Финансирование работы

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, грант № 16-08-00789 а.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Holm H. Electric Contacts. Berlin: Springer-Verlag, 2010. 482 p.
- [2] Гнесин Р.В., Минакова, М.Л., Грекова и др. // Порошковая металлургия. 1995. № 7–8. С. 32–40.
- [3] Xu C.-H., Yi D.-Q., Wu C.-P., Wang B., Liu H.-Q., Lu X.-D. // J. Funct. Mater. 2008. Vol. 39. N 8. P. 1306–1309.
- [4] Зеер Г.М. // ФММ. 2012. Т. 113. № 9. С. 1–5.
- [5] Wu C.P., Yi D.Q., Li J., Xiao L.R., Wang B., Zheng F. // J. Alloy Compd. 2008. Vol. 457. N 1–2. P. 565–570.
- [6] Guzmán D., Muñoz P., Aguilar C., Iturriza I., Lozada L., Rojas P.A., Thirumurugan M., Martínez C. // Appl. Phys. A: Mat. Sci. Proc. 2014. Vol. 117. N 2. P. 871–875.
- [7] Sekikawa J., Kubono T. // IEICE Tr. Electron. 2010. Vol. E93-C. N 9. P. 1387–1392.
- [8] Čosović V., Talić N., Živković D., Minić D., Živković Ž. // J. Min. Metall. Sect. B-Metall. 2012. Vol. 48 (1). P. 131–141.
- [9] Swingler J., Sumption A. // Rare Metals. 2010. Vol. 29. N 3. P. 248–254.
- [10] Krätzschar A., Herbst R., Mützel T., Niederreuther R., Braumann P. // Proc. of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Charleston, SC, USA, 2010. P. 127–133.
- [11] Qiao X., Shen Q., Zhang L., Chen L., Fan X., Yang H. // Rare Metal Mat. Eng. 2014. Vol. 43. N 11. P. 2614–2618.
- [12] Wang H., Yang Q., Wang J. // Proc. of the 5th International Conference on Reliability of Electrical Products and Electrical Contacts (ICREPEC 2014). Wenzhou, China, 2014. P. 295–299.
- [13] Wang J., Li D., Wang Y. // J. Alloy Compd. 2014. Vol. 582. P. 1–5.
- [14] Lim H.N., Nurzulaikha R., Harrison I., Lim S.S., Tan W.T., Yeo M.C. // Int. J. Electrochem. Sci. 2011. Vol. 6. P. 4329–4340.
- [15] Zhu Y., Wang J., An L., Wang H. // Rare Metal Mat. Eng. 2014. Vol. 43 (7). P. 1566–1570.
- [16] Yancai Z., Jingqin W., Liqiang A., Haitao W. // Adv. Mater. Res. 2014. Vol. 936. P. 486–490.
- [17] Zhu Y., Wang J., Wang H., Ding J. // Mater. Sci. Forum. 2014. Vol. 789. P. 270–274.
- [18] Kim J.K., Jang D.J., Ju K.I., Lee E.H., Um S.Y., Nam T.W. // J. Korean Inst. Met. Mater. 2008. Vol. 46. N 7. P. 443–448.
- [19] Schatt W., Wieters K.-P., Kieback B. Pulvermetallurgie. Technologien und Werkstoffe. Dresden: Springer-Verlag, 2007. 547 p.

- [20] *Jiang Y., Liu S.H., Chen J.L., Mao Y., Xie M., Sun X.D.* // Mater. Res. Innov. 2015. Vol. 19. N S4. P. 152–156.
- [21] *Зеер Г.М., Зеленкова Е.Г., Белецкий В.В., Николаев С.В., Кожурин А.Н., Кучинский М.Ю., Григорьева О.А.* // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 12. С. 88–93.
- [22] *Ivanov V., Sidorak A., Shubin A., Kotlyarov I.* // J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol. 2014. Vol. 7. N 2. P. 229–234.
- [23] *Николенко А.Н., Пасенко А.А., Пивоваров А.А., Мельников Б.И.* // Вопр. химии и хим. технологии. 2010. № 5. С. 102–109.
- [24] *Dulin F.H., Rase D.E.* // J. Am. Ceram. Soc. 1960. Vol. 43. N 3. P. 125–131.
- [25] *Mohammadia M.R., Fray D.J.* // J. Eur. Ceram. Soc. 2010. Vol. 30. P. 947–961.
- [26] *Zeер G.M., Zelenkova E.G., Nikolaeva N.S., Zharkov S.M., Abkaryan A.K., Mikheev A.A.* // Sci. Sinter. 2018. Vol. 50. N 2. P. 173–181.
- [27] *Yang G., Yan Z., Xia T.* // Appl. Surf. Sci. 2012. Vol. 258. P. 8704–8712.
- [28] *Kumar S., Gupta M., Sathe V., Shripathi T., Phase D.M., Das B.* // Phase Transit. 2015. Vol. 88. N 11. P. 1122–1136.