

ТИМОФЕЕВА Л.А., доктор технических наук, профессор,  
МОРОЗОВ В.С., соискатель кафедры качества, стандартизации, сертификации и технологий изготовления материалов (Украинский государственный университет железнодорожного транспорта)

## Дугостойкий электроконтактный материал на основе меди для электроаппаратуры тягового подвижного состава

*В статье приводятся данные лабораторных исследований разработанного электроконтактного материала  $Cu-C-ZrO_2-TiO_2-TiB_2$  для электроаппаратуры тягового подвижного состава. Установлено, что новый материал более износостойкий в сравнении с широко применяемым материалом  $Cu-W$ , это обусловлено высокой температурой разупрочнения и образованием на поверхности нового материала, отслаивающихся оксидов со слабой связью с основой. Разработанный материал обладает низким удельным электрическим и контактным сопротивлением, высокой электропроводностью, не требует сложного оборудования для изготовления, имеет повышенный срок службы, может быть применен в силовых цепях.*

**Ключевые слова:** электрические контакты, композиционный материал, дугостойкость, износостойкость, структурные исследования.

### Постановка проблемы

На современном этапе развития железнодорожного транспорта с повышением мощности и скоростей движения, острой становится проблема повышения надёжности, безопасности и безотказности работы электротехнического оборудования тягового подвижного состава. Среди причин отказов электрической аппаратуры тягового подвижного состава, значительную часть составляют неисправности контактных соединений, до 30%. Проблемы при эксплуатации электрических контактов связаны с преждевременным изнашиванием рабочей части, разрушением частей конструкций контакта, отпаиванием электрических контактов от держателей, нарушениями условий эксплуатации и др. [1]. Установлено, что широко используемые материалы для электрических контактов в электроаппаратуре тягового подвижного состава, такие как: медь, серебро и композиты на их основе, не обеспечивают заданной срок службы контактов и безотказность их работы в эксплуатации, имеют большую себестоимость ремонтных работ, низкую электроэрозионную стойкость и электропроводность. Поэтому, разработка материала для электрических контактов, который обеспечивал бы надёжность и безотказность работы электрической аппаратуры, повышение срока службы контактов, предотвращение отрыва электрических контактов от держателей, снижение себестоимости ремонтных работ, является актуальной задачей.

### Постановка задачи

Обосновать технико-экономическую эффективность нового дугостойкого электроконтактного материала на основе меди, как альтернативы для замены широко применяемых контактных материалов в электроаппаратуре тягового подвижного состава.

### Основной материал исследования

Большинство контактов электрической аппаратуры тягового подвижного состава железных дорог работают при высоких значениях силы тока, напряжения, давления и т. д. При работе в таких режимах, между контактами возникает электрическая дуга, что увеличивает износ поверхности контактов и может привести к преждевременному выходу из строя, а впоследствии - и к скорому выходу из строя всей аппаратуры в целом, на которой они установлены. В силовых контактных соединениях, вследствие температурного воздействия, вызванного в том числе и электрической дугой, ускоряются окислительные процессы. Окисные пленки большинства металлов не проводят электрический ток и резко повышают переходное сопротивление, что приводит к повышению температуры в зоне контакта, а впоследствии - к перегреванию и разрушению контактных деталей.

Известно, что работоспособность электрических контактов зависит от высокой электропроводности, механической прочности, твердости, низкого переходного сопротивления и отсутствия свариваемости. Эти свойства являются структурно-чувствительными и поэтому существенно зависят от

фазового і хімічного складу, дисперсності, пористості і рівномірності розподілу дугогасячих і дисперсно-упрочнюючих добавок в матричному матеріалі. На сьогоднішній день проблематичним є отримання заданих властивостей в електроконтактних матеріалах на основі міді, які широко застосовуються в електроапаратурі тягового подвижного складу, так як, стоїть проблема отримання структури з рівномірним розподілом добавок. Розв'язання даного питання знайдено при розробці нового композиційного електроконтактного матеріалу на основі міді, який містить борид титану і графіт з додаванням дугогасячих добавок у вигляді діоксида цирконію і оксиду титану ( $\text{Cu-C-ZrO}_2\text{-TiO}_2\text{-TiB}_2$ ) [2]. Наявність бориду титану в композиті забезпечує зниження кінцевого кута смачування міддю графіта, який перебуває в структурі після випаровування частини металу, залишається на поверхні, утворюючи графітові ділянки, інша його частина переходить в  $\text{CO}_2$  [3]. Вуглекислий газ розкладається на графіт і кисень на поверхні міді. Саме на цей процес витрачається частина енергії горіння електричної дуги, а на підвищення температури і руйнування контакту витрачається менше енергії [4]. Крім того, вуглеграфітовий каркас, пропитаний даним матричним сплавом, має більш високу щільність і прочні характеристики.

Були проведені порівняльні лабораторні дослідження нового композиційного матеріалу  $\text{Cu-C-ZrO}_2\text{-TiO}_2\text{-TiB}_2$  і матеріалу, який широко застосовується, а саме  $\text{Cu-W}$ .

Термін служби електричних контактів повинен забезпечувати пробіг електроапаратури тягового подвижного складу між капітальними ремонтами. Однак, на практиці, в зв'язі з підвищенням потужності і швидкості тягового подвижного складу, дане

вимога часто не виконується. Тобто, контакти, виготовлені з матеріалу системи  $\text{Cu-W}$ , інтенсивно изнашуються. В більшості випадків це пов'язано з низькою електроерозійною стійкістю даного матеріалу.

Застосування вольфраму в електроконтактному матеріалі на основі міді, вимагає спеціальної технології виготовлення таких контактів, використання високотемпературних печей, значно ускладнює технологію отримання такого композиту [5].

Новий матеріал системи  $\text{Cu-C-ZrO}_2\text{-TiO}_2\text{-TiB}_2$ , більш економічний, не вимагає складного обладнання для виготовлення, має підвищений термін служби, за рахунок високої електроерозійної стійкості, може бути застосований в сильноточних цепях. Розроблений матеріал має низький питомий електричний і контактний опір, високу електропровідність, здатністю утворювати на робочій поверхні оксидні плівки з низьким питомим опором або, так звані, нестійкі плівки, а також відносно високою температурою розм'якшення.

Лабораторні випробування проводилися з метою оцінки впливу оксидної плівки і температури розм'якшення на знос контактів при виникненні електричної дуги. Випробування проводилися при напрузі 50 В і струмі 1250 А. Для кожного з зразків була визначена його маса на аналітичних вагах з точністю до 0,001 г і перехідний опір між двома контактами. Проводилися ряд циклів замикання і розмикання електричних контактів в кількості 180 раз. В табл. 1 представлені результати випробувань впливу оксидів на інтенсивність изнашивания.

Таблиця 1

Результати випробувань впливу оксидів на інтенсивність изнашивания

№ п/п	Матеріал	Маса контактів, г			Перехідний опір, мОм	
		до випробувань	після випробувань	зміна	до випробувань	після випробувань
1	$\text{Cu-W}$	55,386	55,123	0,263	0,049	0,343
		55,445	55,158	0,287		
2	$\text{Cu-C-ZrO}_2\text{-TiO}_2\text{-TiB}_2$	55,271	55,183	0,088	0,045	0,221
		55,359	55,255	0,104		

Враховуючи той факт, що мідь в зв'язі з вольфрамом має температуру розм'якшення близьку до температури робочої області, на її поверхні виникає наклеп з одночасним отжигом. Непосередньо у поверхні утворюється

шар товщиною близько 300 мкм отожженої міді, здатний до схватыванию при наступному замиканні електричних контактів. Під цим шаром залишається шар наклепаного матеріалу товщиною до 200 мкм. При наступному розмиканні

электрических контактов происходит отрыв частиц с одной из поверхностей размером до 500 мкм.

Снижение износа образцов контактов из материала  $\text{Cu} - \text{C} - \text{ZrO}_2 - \text{TiO}_2 - \text{TiB}_2$  обусловлено высокой температурой разупрочнения по сравнению с  $\text{Cu} - \text{W}$  и образованием на поверхности нового материала отслаивающихся оксидов со слабой связью с основой.

Для выявления характера и определения механизма воздействия электрической дуги на поверхность контактного материала системы  $\text{Cu} - \text{C} - \text{ZrO}_2 - \text{TiO}_2 - \text{TiB}_2$  были проведены детальные исследования микроструктуры материала. Для каждого дугового разряда, воздействующего на поверхность электрического контакта, было измерено контактное сопротивление, с целью определить его влияние на физико-механические характеристики материала и проследить эволюцию поверхностного слоя рабочей области контактов, рис. 1.

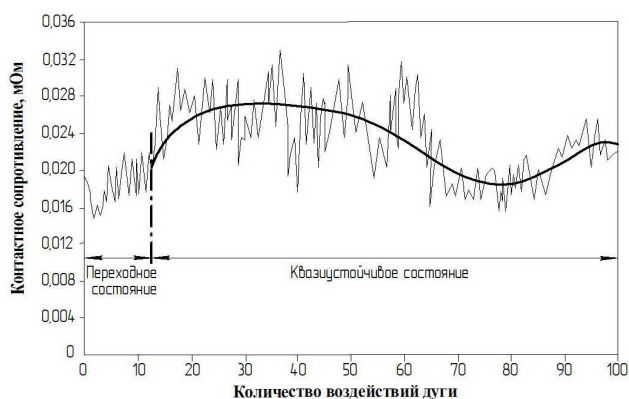


Рис. 1. Зависимость контактного сопротивления от количества воздействий электрической дуги на контактную поверхность

Полученная зависимость показывает, что на первом этапе (переходное состояние) наблюдаются процессы агломерации частиц циркония и титана в большие кластеры в зонах воздействия дуги. Это приводит к уменьшению вязкости, теплопроводности, электропроводности и повышению контактного сопротивления материала. В процессе увеличения количества воздействий электрической дуги достигается так называемое — квазистационарное состояние, при котором величина контактного сопротивления находится близ среднего значения. Во время этой фазы, размеры и распределение кластеров циркония и титана меняются. Они становятся меньше и равномерно распределяются по поверхности, что и обеспечивает хорошую электроэрозионную стойкость (рис.2). Достаточная теплопроводность контактного слоя позволяет теплу проходить быстрее, не повышая температуры контакта, обеспечивается высокая электропроводность и снижается контактное сопротивление. Следует заметить, что соотношение

оксидов циркония и титана, наблюдаемое во время этой фазы, обеспечивает хорошую сопротивляемость свариванию поверхностей контактов. Элементный состав области воздействия дуги представлен на рис. 3.

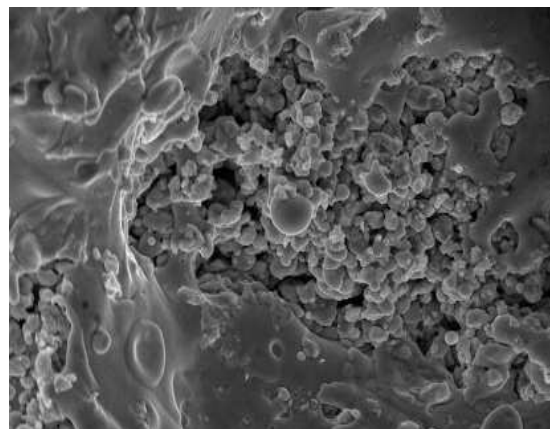


Рис. 2. Микроструктура полости (ванны) наполненной частицами оксидов циркония, титана и борида титана

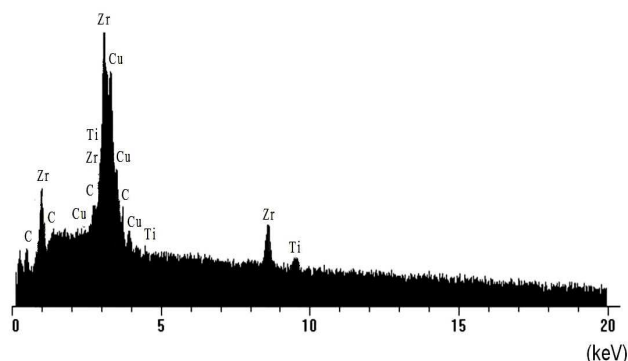


Рис. 3. Рентгеновский спектральный анализ рабочей поверхности электрического контакта из материала  $\text{Cu} - \text{C} - \text{ZrO}_2 - \text{TiO}_2 - \text{TiB}_2$

В процессе горения дуги, происходит образование так называемой ванны — расплава из меди с частицами диоксида циркония, титана и борида титана в нем. Под воздействием дуги, частицы добавок образуют большие кластеры. Образовавшиеся кластеры поднимаются на поверхность расплава в ванне, так как, плотность меди составляет около  $8,92 \text{ г/см}^3$ , а плотность диоксида циркония  $5,8 \text{ г/см}^3$ , оксида титана  $4,01 \text{ г/см}^3$  и борида титана  $4,52 \text{ г/см}^3$ . После затвердевания расплава, вследствие разницы температур плавления меди и добавок, наблюдается образование пузырьков кислорода в ванне, что способствует гранулированной форме частиц оксидов циркония, титана и борида титана. Таким образом, в процессе работы контакта, происходит регенерация поверхностного слоя материала контакта.

**Выводы**

1. Разработан новый электроконтактный материал системы  $\text{Cu} - \text{C} - \text{ZrO}_2 - \text{TiO}_2 - \text{TiB}_2$ . Данный материал более экономичный, не требует сложного оборудования для изготовления, имеет повышенный срок службы, за счет высокой электроэрозионной стойкости, может быть применен в сильноточных цепях. Новый композит обладает относительно высокой температурой разупрочнения и способностью образовывать на рабочей поверхности оксидные пленки с низким удельным сопротивлением или, так называемые, неустойчивые пленки.

2. Однородность микроструктуры, снижение внутренней пористости за счет равномерности распределения дугогасящих добавок  $\text{ZrO}_2$  и  $\text{TiO}_2$ , уменьшение количества и размеров агломератов в новом композиционном электроконтактном материале обеспечивают требуемые физико-механические характеристики.

3. В процессе работы электрического контакта изготовленного из нового материала происходит регенерация поверхностного слоя рабочей зоны, что обеспечивает повышенную дугостойкость, уменьшается удельное электрическое и контактное сопротивление, а, следовательно, повышается электропроводность. Все перечисленное обеспечивает повышенный срок службы и качество работы контактов электроаппаратуры тягового подвижного состава.

4. Проведенные сравнительные исследования подтверждают заявленные свойства нового материала и позволяют рекомендовать его к использованию вместо широко применяемого, но экономически не целесообразного, материала  $\text{Cu} - \text{W}$ .

**Литература**

1. Захарченко, Д. Д. Тяговые электрические аппараты / Захарченко Д. Д. – М.: Транспорт, 1991. – 247 с.
2. Пат. №107172 Україна, (2014) B22F 3/00. Модифікація електроконтактного матеріалу на основі міді / [Вовк Р.В., Тимофєєва Л.А., Тимофєєв С.С., Дьомін А.Ю., Морозов В.С.]; заявник та патентовласник Українська державна академія залізничного транспорту. – №a2014 03301, заяв. 01.04.2014; опубл. 25.11.2014, Бюл. №22.
3. Нотон, Б. Применение композиционных материалов в технике [Текст] / Б. Нотон. – М.: Машиностроение, 1978. – 508 с.
4. Хольм, Р. Электрические контакты [Текст] / Р. Хольм. – М.: изд. Иностранной литературы, 1961. – 464 с.
5. Берент, В. Я. Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта [Текст] / В. Я. Берент. – М.: Интекст, 2005. – 408 с.

**Тимофєєва Л.А., Морозов В.С. Дугостійкий електроконтактний матеріал на основі міді для електроапаратури тягового рухомого складу.** У статті наводяться дані лабораторних досліджень розробленого електроконтактного матеріалу  $\text{Cu}-\text{C}-\text{ZrO}_2-\text{TiO}_2-\text{TiB}_2$  для електроапаратури тягового рухомого складу. Встановлено, що новий матеріал більш зносостійкий в порівнянні з широко вживаним матеріалом  $\text{Cu}-\text{W}$ , це обумовлено високою температурою знеміцнення і утворенням на поверхні нового матеріалу оксидів зі слабким зв'язком з основою. Розроблений матеріал має низький питомий електричний і контактний опір, високу електропровідність, не вимагає складного обладнання для виготовлення, має підвищений термін служби, може бути застосований в потужнострумових ланцюгах.

**Ключові слова:** електричні контакти, композиційний матеріал, дугостійкість, зносостійкість, структурні дослідження.

**Timofeyeva L.A., Morozov V.S. Arc-resistant copper-based electrocontact material for electrical equipment of traction rolling stock.** The article presents laboratory data of the developed  $\text{Cu}-\text{C}-\text{ZrO}_2-\text{TiO}_2-\text{TiB}_2$  electrocontact material for electrical equipment of traction rolling stock. It has been established that the new material is more wearproof in the comparison with the widely used  $\text{Cu}-\text{W}$  material, it is caused by high softening temperature and the formation of a new material and flaking-off oxides with a weak bond with the foundation. The developed material has low specific electrical and contact resistance, high conductivity, does not require sophisticated equipment for manufacturing, has a long life and can be used in high-current circuits.

Microstructure homogeneity, reduced internal porosity due to the evenness of the distribution of arc suppressive additives  $\text{ZrO}_2$  and  $\text{TiO}_2$ , the reduction of the number and size of the agglomerates in a new composite electrocontact material provide the required physical and mechanical characteristics. The addition of titanium boride into the copper-based alloy allowed obtaining higher strength and casting properties of the original matrix alloy. Besides, graphitized carbon frame impregnated with the given matrix alloy has higher density and strength characteristics.

**Key words:** electrical contacts, composite material, arc-resistance, wear resistance, structural research.

Рецензент д.т.н., професор Геворкян Е.С. (УкрГУЖТ)

Поступила 13.10.2015г.

**Тимофєєва Л.А.**, доктор технічних наук, професор, завідувача кафедрою якості, стандартизації, сертифікації та технологій виготовлення матеріалів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.

**Морозов В.С.**, здобувач кафедри якості, стандартизації, сертифікації та технологій виготовлення матеріалів, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.

**Timofeyeva L. A.**, Doctor of engineering, professor, head of the department of quality, standardization, certification and production technology of materials, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

**Morozov V. S.**, Candidate for a degree department of quality, standardization, certification and production technology of materials, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.