



# ВЕСТНИК Машиностроения

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

**3**  
**2016**

ИЗДАЕТСЯ С НОЯБРЯ 1921 ГОДА

*Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней*

Журнал переводится на английский язык, переиздается и распространяется во всем мире фирмой "Аллертон Пресс" (США)

ООО «Издательство «Инновационное машиностроение»

Адрес издательства:

107076, Москва, Колодезный пер., д. 2А, стр. 2

Телефон: 8-(499)-269-52-98

Факс: 8-(499)-269-48-97

Адрес редакции:

**107076, Москва,**

**Колодезный пер., д. 2А, стр. 2**

**Телефон: 8-(495)-661-38-80.**

**E-mail: [vestmash@mashin.ru](mailto:vestmash@mashin.ru); [vestmash@mail.ru](mailto:vestmash@mail.ru)**

**[www.mashin.ru](http://www.mashin.ru)**

Журнал зарегистрирован 19 апреля 2002 г. за № 77-12421 в Комитете Российской Федерации по печати

Учредитель: А.И. Савкин

Индексы: **70120** ("Роспечать"),  
**27841** ("Пресса России"),  
**60264** ("Почта России")

Цена свободная

Отпечатано в ООО "Канцлер",  
150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.

Оригинал-макет: ООО «Авансед солишнз».

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.

Сайт: [www.aov.ru](http://www.aov.ru)

**Главный редактор А.И. САВКИН**

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

**Албагачиев А. Ю.**, д-р техн. наук, **Алешин Н.П.**, д-р техн. наук, акад. РАН, **Братухин А.Г.**, д-р техн. наук, **Воронцов А.Л.**, д-р техн. наук, **Гусейнов А.Г.**, д-р техн. наук, **Дмитриев А.М.**, д-р техн. наук, член-корр. РАН (председатель секции обработки материалов без снятия стружки), **Драгунов Ю.Г.**, д-р техн. наук, член-корр. РАН, **Древаль А.Е.**, д-р техн. наук (председатель секции технологии машиностроения), **Кутин А.А.**, д-р техн. наук, **Омельченко И.Н.**, д-р техн. и экон. наук (председатель секции организации и экономики производства), **Кузин В.В.**, д-р техн. наук, **Попов Д.Н.**, д-р техн. наук, **Попов А.В.**, д-р техн. наук, **Рыбин В.В.**, д-р техн. наук, член-корр. РАН, **Трегубов Г.П.**, д-р техн. наук, **Скугаревская Н.В.** (ответственный секретарь)

УДК 621.382

И. С. ГЕРШМАН, д-р техн. наук, Е. И. ГЕРШМАН (ОАО "ВНИИЖТ", г. Москва), e-mail: isgershman@gmail.com

## Восстановление изношенных участков контактных проводов без их демонтажа<sup>1</sup>

Предложены технология и состав смеси для восстановления газодинамическим напылением изношенных участков контактных проводов электрифицированного железнодорожного транспорта без их демонтажа.

**Ключевые слова:** контактный провод, электропроводность, интенсивность изнашивания, трение, восстановление, газодинамическое напыление, адгезия, токосъем.

The technology and mixture composition for restoration by gas-dynamic spraying of worn zones of contact wires of electrified rail transport without their demounting are suggested.

**Keywords:** contact wire, conductivity, wear rate, friction, restoration, gas-dynamic spraying, adhesion, current collection.

Контактный провод — основной элемент контактной сети электрифицированного железнодорожного транспорта, подвергается интенсивным электрическому, термическому и механическому воздействиям, например, трению с токоприемником при токосъеме. Контактный провод эксплуатируется при постоянном напряжении натяжения от 100 МПа на обычных линиях до 280 МПа на высокоскоростных линиях [1]. Через контактный провод проходит электрический ток силой до 4 кА. Допускается длительный нагрев провода до 100 °С.

Контактные провода изготавливают холодным волочением или прокаткой из меди или низколегированных медных сплавов:

Cu—Ag, Cu—Sn, Cu—Cd, Cu—Mg с содержанием 1 мас. % легирующих элементов [1].

Площадь сечения контактных проводов от 100 до 170 мм<sup>2</sup>. В зависимости от площади сечения проводов и их химического состава временное сопротивление при растяжении составляет от 352 до 510 МПа [1].

Провода изнашиваются в местах контакта с токоприемником. При предельном износе, который составляет от 20 до 30 % сечения провода, изношенный контактный провод заменяют новым. Срок службы контактных проводов — от 15 до 40 лет. Однако существуют участки с ограниченным вертикальным или горизонтальным перемещением, на которых контактный провод имеет повышенный износ; предельный износ на таких участках достигается в течение 3—5 лет. Длина участков местного износа ≈ 0,5 м [2].

На обычных линиях местный износ устраняют, как правило, заменой изношенного участка новым проводом. На высокоскоростных железнодорожных линиях такая замена невозможна, так как напряжение натяжения проводов в 2—3 раза выше, чем на обычных линиях. Поэтому на контактных проводах высокоскоростных линий запрещены любые виды соединений. В этом случае при достижении предельного местного износа заменяют около 1,5 км (≈ 1500 кг) контактного провода [3]. В связи с этим весьма актуально восстановление местного износа контактного провода без его демонтажа.

Рассмотрим общие требования к восстановлению изношенного контактного провода:

восстанавливают медную плоскую изношенную поверхность шириной около 11 мм и длиной до 700 мм, толщина восстановленного слоя должна составлять  $1 \div 2$  мм;

скорость нанесения слоя должна быть не менее 0,5 м/ч, что связано с ограниченным временем ремонта контактной сети, чтобы не задерживать движение поездов;

адгезия нанесенного слоя с медной подложкой — не менее 15 МПа, что гарантирует их хорошее сцепление;

удельная электропроводность восстановленного слоя — не менее 10 МСм/м, исключает нагрев контактных проводов в результате трения при токосъеме;

при восстановлении не должно быть отжига контактного провода, приводящего к его перегреву и потере прочности.

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 15-19-00217.

Детонационные методы напыления не удовлетворяют требованию быстрого восстановления местного износа контактного провода.

Для исключения отжига фактически запрещается применение газотермических методов напыления. Так в Японии в 1980-х годах пытались восстановить изношенный участок контактных проводов городского электрифицированного транспорта газотермическим методом [2], для чего применили сложную систему охлаждения: в результате за 4 ч на изношенный участок провода длиной около 1 м удалось нанести слой толщиной 0,8 мм. Поэтому газотермические методы признали непригодными для восстановления контактных проводов.

Требование повышенной электропроводности значительно ограничивает выбор технологии восстановления.

В работе [2] было предложено на изношенные участки контактного провода приклеивать медные полосы электропроводным клеем. Однако они отклеивались через несколько дней.

Кроме того, при восстановлении провода необходимо соблюдать требования безопасности: восстановленный слой при отрыве от контактного провода не должен повредить токоприемник. Например, приклеенная медная пластина отрывается от контакт-

ного провода целиком и может повредить токоприемник, а напыленный порошковый слой отрывается частями, не повреждая его. Поэтому для восстановления местного износа контактного провода предпочтительнее порошковые технологии напыления.

Так как традиционные методы восстановления (напыления) не пригодны для решения этой проблемы из-за высокой температуры напыления и низкой экономической эффективности, в работе [4] предложено холодное газодинамическое напыление порошка на основе меди. При таком напылении нагревается лишь газ-носитель (как правило, воздух) до температуры  $\approx 300$  °С, а поверхность, на которую наносится слой, не нагревается. Данная технология позволяет наносить слои толщиной в несколько миллиметров при достаточно высокой производительности; энергопотребление устройства для напыления может обеспечить автотоматический процесс, используемая при ремонте контактной сети.

Авторы работы исследовали влияние режимов напыления и составов напыляемых порошков на прочность сцепления с медной подложкой и удельную электропроводность. При холодном газодинамическом напылении сцепление нанесенного слоя с подложкой осуществляется только в

результате схватывания, т. е. на уровне действия молекулярных сил при трении [5].

Напыление происходит следующим образом. Металлический порошок в струе воздуха со скоростью, близкой к скорости звука, наносится на металлическую поверхность. При этом часть порошка отражается от поверхности, а часть прилипает к ней в результате сил адгезии. Если воздушную струю с порошком направлять к поверхности не перпендикулярно, а под углом, то наряду с нормальной составляющей скорости будет действовать тангенциальная составляющая, которая создает силу трения частиц порошка о поверхность, при этом повышается вероятность схватывания. В работах [6, 7] процесс схватывания рассматривается согласно законам неравновесной термодинамики и теории самоорганизации, что приводит к следующему выводу: если при трении в зону схватывания переносятся преимущественно тяжелые химические элементы, то площадь схватывания уменьшается; если преимущественно легкие элементы, то площадь схватывания увеличивается.

Выбор меди в качестве основы порошковой смеси для напыления обусловлен ее высокой электропроводностью, коррозионной стойкостью и доступностью. В качестве добавок к порошку выбрали легкие по сравнению с медью химические элементы — цинк, алюминий, олово и железо (табл. 1) [8, 9].

Известно, что для схватывания, в том числе напыляемого порошка, с поверхностью его частицы должны пластически деформироваться, а на напыляемой поверхности не должны образовываться окислы [5]. Анализ свойств элементов (см. табл. 1), показал, что применение олова невозможно из-за его низкой температуры плавления. При напылении смеси порошков меди и

Показатели химических элементов, применяемых для легирования медных порошков

Таблица 1

Химический элемент	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Температура $T$ плавления, °С	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Свободная энергия образования оксидов $\Delta G$ , кДж/моль
Cu	8,9	1083	90	-201
Al	2,7	660	50	-1691
Sn	7,3	232	20	-304
Zn	7,13	420	70	-364
Fe	7,86	1536	100	-283

олова частицы олова расплавляются в потоке нагретого воздуха и налипают на сопло, ограничивая выход порошка.

Наименьший предел текучести  $\sigma_T$  имеет алюминий, но он образует наиболее стойкие оксиды, что затрудняет образование ювенильных поверхностей на алюминиевых частицах. Железо и цинк образуют оксиды с близкими значениями, но предел текучести цинка существенно ниже. Поэтому для восстановления изношенных контактных проводов использовали смесь порошков меди и цинка.

Напыление на специальные пробы (рис. 1, см. обложку) из нагартованной меди проводили на установке "Димет". Прочность сцепления напыленного слоя определяли на разрывной машине Schenck-100. Электропроводность измеряли вихретоковым измерителем. Для определения удельной электропроводности порошок напыляли на цилиндры диаметром 15 мм и высотой не менее 2 мм. Напыляли порошковые смеси Cu—Zn различного состава на разных режимах при температурах нагрева газа-носителя 300; 400 и 500 °С.

Испытания на износ с токосъемом проводили на машине трения, имитирующей работу контактного провода и токоприемника. Контактный провод имитировало кольцо диаметром 220 мм из медной проволоки диаметром

4 мм, которое вращалось в горизонтальной плоскости. В двух диаметрально расположенных точках к кольцу прижимали образцы из композиционного порошкового материала на основе железа, содержащего 15 % Pb и 1 % Sn. Длина контакта образца с проволокой составляла 7 мм. Частота вращения проволоки — 200 мин<sup>-1</sup>. Усилие прижатия каждого токосъемного образца к проволоке составляло 10 Н. Зигзаг контактного провода имитировали смещением оси вращения относительно центра окружности проволоки. Износ проволоки определяли по уменьшению ее диаметра.

Проволоку разделили на шесть равных дуг, с трех из них сняли слой меди толщиной 1,5 мм и напылили порошковые смеси составов: Cu + 75 % Zn; Cu + 50 % Zn; Cu + 25 % Zn. Между дугами, имитирующими восстановленные, находились медные дуги (рис. 2, см. обложку).

Диаметры проволоки, а следовательно износы, определяли на каждой дуге. Испытания проводили при линейных плотностях тока: 0; 4; 8,5; 13; 17 А/мм, что соответствовало снимаемому току реального электрифицированного транспорта: 0; 480; 1020; 1560 и 2040 А соответственно.

Прочности сцепления и удельные электропроводности напыленных слоев в зависимости от температуры и состава приведе-

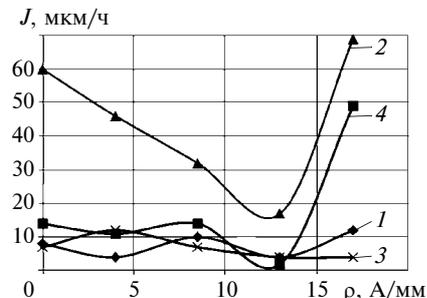


Рис. 3. Зависимости интенсивности  $J$  изнашивания от линейной  $\rho$  плотности тока напыления меди (1) и восстановленных напыленных слоев, содержащих Cu + 25 % Zn (2), Cu + 50 % Zn (3) и Cu + 75 % Zn (4)

ны в табл. 2. Анализ приведенных данных показал, что только порошковая смесь 34 % Cu + 33 % Zn + 33 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (абразив) при температуре напыления 300 °С удовлетворяет вышеприведенным требованиям. Это связано с тем, что абразив, содержащийся в шихте, очищает и активирует поверхность, на которую наносится порошок, и их сцепление увеличивается. Отметим, что в смеси с абразивом (см. табл. 2) соотношение содержания меди и цинка составляло 50 % Cu + 50 % Zn.

Прочности сцепления, приведенные в табл. 2, получены при перпендикулярном напылении к поверхности медной пробы. При напылении смеси состава Cu + 25 % Zn под углом 80÷85° к поверхности прочность сцепления составила 19 МПа, удельная электропроводность — 19 МСм/м.

Зависимости интенсивности  $J$  изнашивания от плотности  $\rho$  тока приведены на рис. 3.

При испытаниях на трение с токосъемом отрыва напыленных слоев не произошло.

Анализ данных, приведенных в табл. 1, показал, что при перпендикулярном напылении лучшую прочность сцепления обеспечивает смесь с абразивом. Лучшую электропроводность имеет смесь, содержащая 70 % Cu + 30 % Zn, а наибольшую электропроводность — смесь с наибольшим со-

Таблица 2  
Прочности сцепления и удельные электропроводности напыленных слоев

Состав смеси	Прочность сцепления, МПа			Удельная электропроводность, МСм/м		
	при температуре напыления, °С					
	300	400	500	300	400	500
34 % Cu + 33 % Zn + 33 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,6	10,4	7,9	11,2	10,7	9,0
50 % Cu + 50 % Zn	6,2	12,1	3,2	14,5	13,1	—
70 % Cu + 30 % Zn	1,1	1,22	1,54	12,4	—	18,9

держанием меди. Однако смесь, содержащая 70 % Cu + 30 % Zn, имеет прочность сцепления в 4–14 раз меньшую по сравнению с другими смесями.

Оптимальная температура напыления — 300÷400 °С (см. табл. 2).

При напылении под углом 80÷85° значительно повышаются прочность сцепления и удельная электропроводность смеси. Поэтому для испытаний на трение с токоъемом порошок напыляли под углом 85°. Во всем диапазоне линейных плотностей тока лучшей износостойкостью обладает смесь 50 % Cu + 50 % Zn, которая соответствует износостойкости меди. До плотности тока 13 А/мм износостойкость смеси 25 % Cu + 75 % Zn соответствует износостойкости меди, но при плотности тока  $\rho > 13$  А/мм интенсивность изнашивания увеличивается на порядок. Интенсивность изнашивания смеси 75 % Cu + 25 % Zn существенно выше интенсивностей изнашивания меди и остальных смесей во всем диапазоне плотностей тока.

При увеличении содержания цинка в смеси с 25 до 50 % интенсивность изнашивания уменьшилась в среднем на порядок (см. рис. 3). При увеличении в смеси

цинка с 50 до 75 % интенсивность изнашивания увеличилась примерно в 1,5 раза, а при плотностях тока  $\rho > 13$  А/мм увеличилась на порядок. Таким образом, при увеличении содержания цинка в смеси интенсивность изнашивания сначала значительно снижается, а при дальнейшем увеличении — повышается. Следовательно, для восстановления контактных проводов по интенсивности изнашивания, удельной электропроводности и прочности сцепления оптимальным будет состав смеси Cu + (40÷50) % Zn. При напылении смеси данного состава на отрезок контактного провода слоем толщиной 2 мм и шириной 11 мм скорость напыления должна составлять  $\approx 0,7$  м/ч. На рис. 4 (см. обложку) показано сечение восстановленного контактного провода.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Гершман И. С., Миронос Н. В. Требования к контактным проводам для высокоскоростного железнодорожного транспорта // Вестник ВНИИЖТ. 2011. № 3. С. 13–17.
2. Купцов Ю. Е. Беседы о токо-съеме. М.: Модерн А, 2001. 256 с.
3. Biesenack H., Pintscher F. Kontakt zwischen Fahrdrabt und Schlei-

fleiste-Ausgangspunkte zur Bestimmung des elektrischen Verschleißes // Elektrische Bahnen. 2005. N 3. P. 138–146.

4. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика // А. П. Алхимов, С. В. Клинков, В. Ф. Косарев, В. М. Фомин. М.: Физматлит, 2010. 536 с.

5. Tabor D. Friction as dissipative process // Fundamentals of Friction: Macroscopic and Microscopic Processes; Eds. I. L. Singer, H. M. Pollock. Vol. 220, NATO ASI Series E: Applied Sciences. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, 1992. P. 3–24.

6. Gershman J. S., Bushe N. A. Thin films and self-organization during friction under the current collection conditions // Surface & Coating Technology. 2004. 186. P. 405–411.

7. Surface — Engineered Tool Materials for High Performance Machining / G. S. Fox-Rabinovich, A. I. Kovalev, J. L. Endrino et. al // Self-Organization During Friction. Advanced Surface Engineered Materials and Systems Designed. Taylor & Francis Group. Boca Raton. London—New York. 2006. Ch. 9. P. 231–297.

8. Свойства неорганических соединений: Справочник / А. И. Ефимов, Л. П. Белорукова, И. В. Василькова, В. П. Чечев. М.: Химия, 1983. 392 с.

9. Справочник по конструкционным материалам / Под ред. Б. Н. Арзамасова, Т. В. Соловьевой. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 640 с.

### Вниманию авторов

Не допускается предлагать к публикации уже опубликованные или намеченные к публикации в других журналах материалы.

Статьи в редакцию можно присылать на e-mail: vestmash@mashin.ru. В случае пересылки статьи почтой, кроме текста, напечатанного на белой бумаге формата А4 на одной стороне листа через 1,5–2 интервала 14-м кеглем, необходимо прикладывать электронную версию (шрифт Times New Roman в Microsoft Word, 14-й кегль, расстояние между строк 1,5).

#### К статье прилагаются:

1) акт экспертной комиссии, подтверждающий, что статья не содержит материалов, входящих в перечень сведений, отнесенных к государственной тайне Указом Президента РФ № 1203 от 30.11.1995, и может быть опубликована в открытой печати;

2) аннотация (1–3 предложения) и ключевые слова;

3) сведения об авторах (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученая степень, адрес, e-mail, телефон). Объем статьи не должен превышать 20 страниц (с рисунками и таблицами). Все страницы должны быть пронумерованы. Рисунки и таблицы давать после текста.

Представляя статью в редакцию для публикации, авторы выражают согласие с тем, что:

1) статья может быть переведена и опубликована на английском языке;

2) после публикации в журнале материал может быть размещен в Интернете;

3) авторский гонорар за публикацию статьи не выплачивается.

Редакция оставляет за собой право сообщать автору о результатах рецензирования без предоставления рецензии.

Представленные в редакцию материалы обратно не высылаются.

Минимальный срок публикации — 4 месяца со дня предоставления рукописи в редакцию при соблюдении всех изложенных выше требований (обусловлен технологическим процессом).



Рис. 1. Проба для определения прочности сцепления напыленного слоя с подложкой



Рис. 2. Кольцо из медной проволоки с восстановленными дугами для испытаний на износ с токобъемом

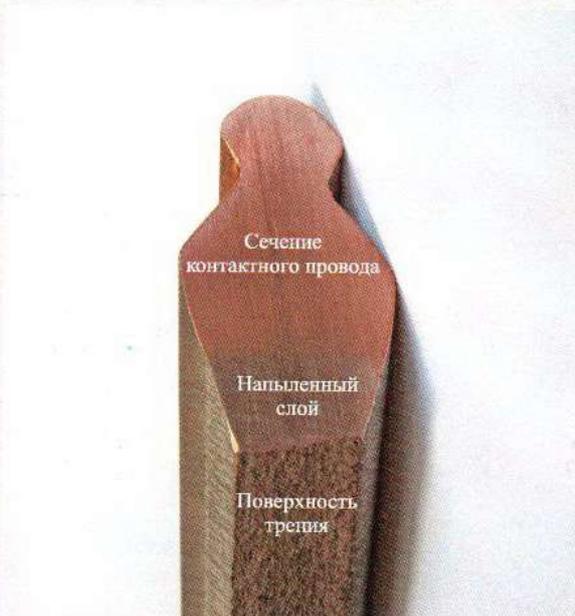


Рис. 4. Сечение восстановленного контактного провода