

УДК 621.332.32

Выявление причин излома контактного провода на элементах устройств секционирования с применением фрактографического исследования и спектрального анализа

И. В. Тарабин¹, Д. В. Муравьев¹, И. А. Кремлев¹, И. А. Терехин²

¹ Омский государственный университет путей сообщения, Россия, 644046, Омск, пр. Маркса, 35

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Тарабин И. В., Муравьев Д. В., Кремлев И. А., Терехин И. А. Выявление причин излома контактного провода на элементах устройств секционирования с применением фрактографического исследования и спектрального анализа // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 2. С. 42–50. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-02-42-50

Аннотация

Цель: установить причины излома дугогасительных рогов секционных изоляторов контактной сети. **Методы:** фактографический анализ поверхности излома и спектрального анализа провода. **Результаты:** в работе представлены результаты фактографического анализа поверхности излома и спектрального анализа проводов контактной сети. **Практическая значимость:** результаты исследований будут использованы при разработке технических условий на изготовление контактных фасонных проводов, а также требований к установке и регулировке секционных изоляторов.

Ключевые слова: секционный изолятор, сопряжение, дугогасительный рог, контактный провод, фрактографическое исследование, спектральный анализ, токоприемник.

В последнее время участились случаи излома контактного провода в различных элементах контактной сети, что приводит к поломкам элементов контактной сети, обрывам контактного провода в анкерном участке. Секционный изолятор является важным элементом контактной сети, от правильной и надежной работы которого зависит бесперебойное движение электроподвижного состава по сети железных дорог. Разрегулировка или поломка дугогасящих рогов секционных изоляторов приводит к повреждениям токоприемников, контактной сети.

В 2023 году на полигоне Западно-Сибирской железной дороги произошел излом контактного провода на секционном изоляторе, что повлекло за собой повреждение токоприемника электровоза и, как следствие, нарушение графика движения поездов.

Объектом фрактографического исследования является одна часть излома данного контактного провода тяговой сети электрифицированной железной дороги, изготавливаемого в соответствии с требованиями ГОСТ 55647-2018 «Провода контактные из меди и ее сплавов для электрифицированных железных дорог. Технические условия».



Рис. 1. Поломка секционного изолятора:

a — место излома дугогасящего рога; *б* — поврежденный секционный изолятор

Фрактографический анализ поверхности излома проводился на стереоскопическом микроскопе для макроструктурного анализа МСП-2 Z00M с максимальным увеличением 40х в научно-производственной лаборатории «Металловедение и структурный анализ металлов и сплавов» Омского государственного университета путей сообщения. Непосредственно перед изучением под микроскопом поверхность излома была очищена от остатков пыли, грязи и посторонних частиц и материалов.

Анализ позволил получить следующие результаты и сделать основные выводы:

1. Излом является смешанным с характерными признаками в зоне усталостного разрушения в виде усталостных бороздок (рис. 2, *a*), которые представляют собой систему повторяющихся углублений и выступов, ориентированных перпендикулярно к направлению развития трещины от очага трещины А, и являются следом ее перемещения за каждый цикл нагружения. Края усталостных бороздок, вытянутые вдоль внутренней кромки Б канавки провода, имеют следы пластической деформации с надрывами, наплывами, расслоением и раскрытием волнообразных ступеней наружу, совпадающих с примыкающими ступенями, расположенными на зеркальной части излома (рис. 2, *б*). При этом в углублениях

усталостных бороздок заметны следы естественного патинирования темного цвета, что свидетельствует о постепенном последовательном образовании ступеней излома в зоне усталостного разрушения в результате действия циклических знакопеременных нагрузок и поочередном появлении окислов оксидно-карбонатной пленки на каждой новой ступени (рис. 2, в).

2. Зона ускоренного развития трещины указывает на процесс дальнейшего разрушения провода в поперечном сечении, произошедшего по часовой стрелке в направлении 1 от границы В, отделяющей зону усталостного развития трещины, в момент стремительной потери материалом провода прочностных характеристик (см. рис. 2, б). Причем данная зона характеризуется вязким характером разрушения, заключающимся в образовании шелковистой гладкой и блестящей поверхности, когда направление разрушения совпадает с направлением действия максимальных касательных напряжений, а материал обладает высокой пластичностью, что приводит к сглаживанию ямочного рельефа Г поверхности излома при высокой степени пластической деформации (см. рис. 2, в).

3. Зона долома или катастрофического разрушения выглядит размыто, однако имеет четко выраженную границу раздела Д с зоной усталостного разрушения и границу Е с зоной ускоренного развития трещины (рис. 2, з). На фотографии поверхности излома можно наблюдать, что разрушение распространяется по часовой стрелке в направлении 2 от зоны ускоренного развития трещины до зоны долома, причем на границе Е процесс вязкого разрушения сопровождается значительной пластической деформацией на участках 3 и 4, возникающей в результате плавного волнообразного смещения частей излома относительно друг друга, тогда как на границе Д характер излома близок к вязко-хрупкому с образованием язычков 5, которым соответствуют углубления на ответной половине излома (см. рис. 2, з). Далее происходят образование глубоких ямок Ж в результате вырывания металла (см. рис. 2, д) с поверхностью вязкого разрушения и последующее проскальзывание частей провода по поверхности вдоль направления линий б с образованием характерных продольных канавок (см. рис. 2, б), сопровождающееся существенной пластической деформацией металла провода.

4. Установлен очаг разрушения А (см. рис. 2, а), который располагается во впадине канавки, где образовалась трещина и постепенно раскрывалась после каждого цикла нагружения, что в итоге привело к переходу ее в сквозную и разрушению провода.

5. Очагом разрушения контактного провода стала поперечная трещина А (рис. 3, а), которая возникла в основании канавки провода, после чего началось усталостное накопление в металле внутренних растягивающих и сжимающих напряжений в результате колебаний провода под действием знакопеременных циклических нагрузок, передаваемых от токоприемника при движении вверх в момент движения электровоза и при опускании вниз под действием собственной

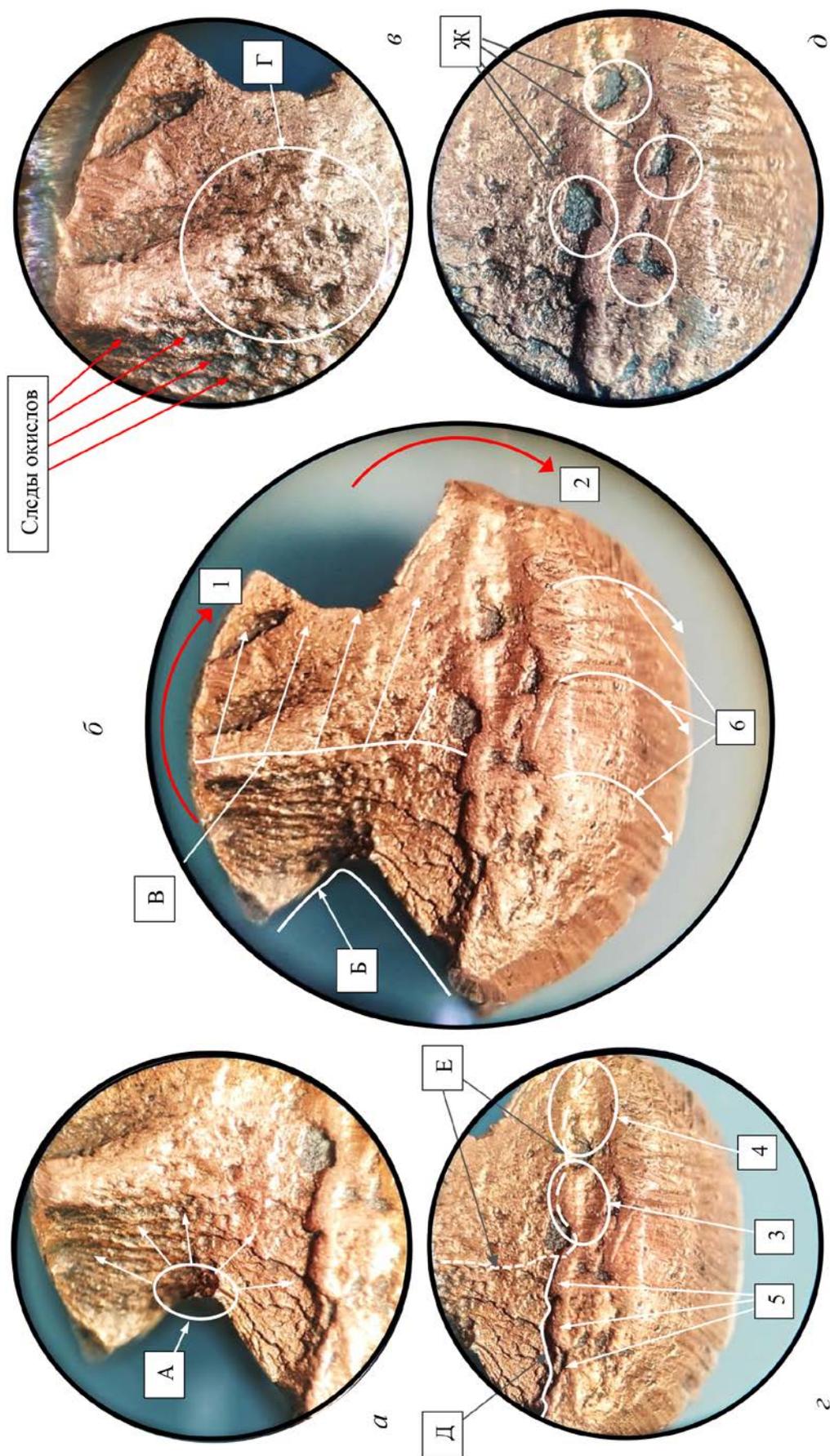


Рис. 2. Фотографии поверхности разрушения контактного провода: *а* — зона усталостного разрушения с очагом А; *б* — поверхность смешанного усталостного излома в поперечном сечении контактного провода; *в* — зона ускоренного развития трещины; *г* — зона пластического долома (кагастрофического разрушения); *д* — участки вязкого вырывания металла

силы тяжести провода после прохождения состава. Поверхность исходной трещины, принадлежащая исследуемому излому, покрыта окисной пленкой темно-коричневого цвета, что хорошо заметно на рис. 3, *а*, и, кроме того, имеет гладкую структуру. При этом на рис. 3, *б* отчетливо видны контур трещины и направления ее развития вглубь металла с образованием усталостного рельефа, начиная с исходных бороздок 1 и 2.

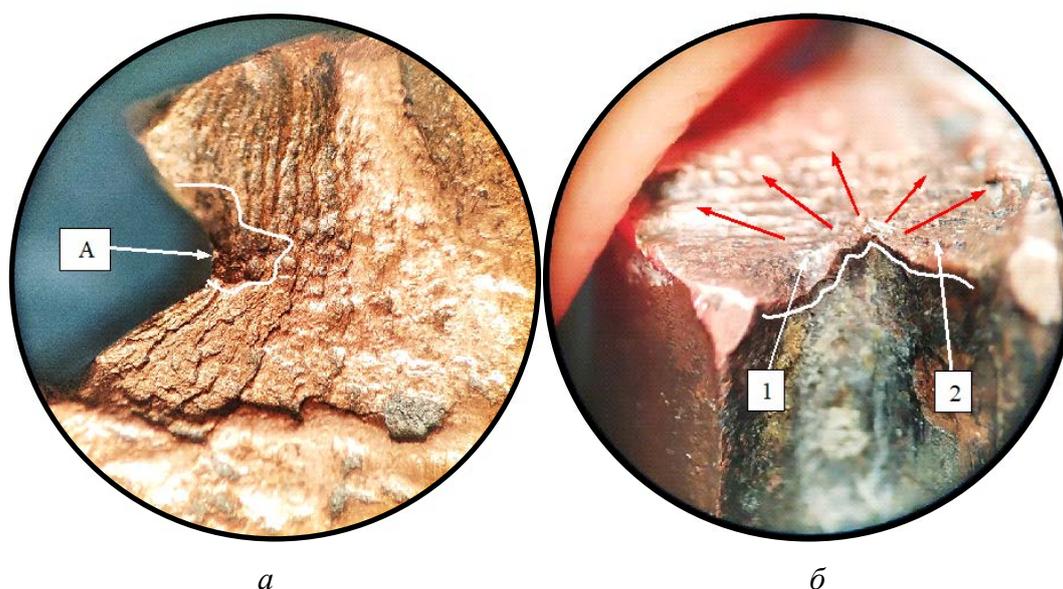


Рис. 3. Очаг разрушения контактного провода: *а* — фокус излома, место расположения трещины А; *б* — контур трещины и направление ее развития со стороны А

В табл. 1 приведены сравнительные данные по сортировке марок меди, использовавшихся при изготовлении разрушенного, нового и эксплуатируемого не менее 30 лет проводов. Ближайшей подходящей по химическому составу маркой меди является М2, что не соответствует заявленной в ГОСТ 55647-2018 марке М1, предназначенной для изготовления фасонных контактных проводов, по содержанию олова, железа и никеля. Однако установлено, что общая концентрация примесей максимальна в меди нового провода и составляет 0,089 %, тогда как в металле дефектного провода она соответствует 0,052 %, а старого провода — 0,02 %. Известно, что примеси влияют на физико-механические свойства меди разнообразно и неоднозначно, а именно:

1) железо (Fe), образуя с медью твердый раствор с концентрацией железа не более 3 %, повышает твердость и хрупкость меди и ухудшает электропроводность, поэтому в марке меди М1 его концентрация ограничена 0,005 %, тогда как в меди исследованных проводов максимальная концентрация железа наблюдается в меди нового и дефектного провода, 0,019 % и 0,016 % соответственно, что, в свою очередь, может снизить их конструкционную прочность;

ТАБЛИЦА 1. Сравнительные данные по сортировке марок меди

Элемент	Провод фасонный контактный (дефектный) ГОСТ 55647-2018	Провод фасонный контактный (новый) ГОСТ 55647-2018	Провод фасонный контактный (старый) ГОСТ 55647-2018	M2	M3	M1
1	2	3	4	5	6	7
Cu	99.948	99.911	99.98	99.7000–100.0000	99.5000–100.0000	99.9000–100.0000
Zn	0.004	0.003	0.0013	–	–	0.0000–0.0040
Sn	0.0152	0.0499	0.0004	0.0000–0.0500	0.0000–0.0500	0.0000–0.0020
Pb	0.0032	0.0017	0.0006	0.0000–0.0100	0.0000–0.0500	0.0000–0.0050
Fe	0.016	0.019	0.012	0.0000–0.0500	0.0000–0.0500	0.0000–0.0050
Ni	0.007	0.007	0.015	0.0000–0.2000	0.0000–0.2000	0.0000–0.0020
Si	0.0011	0.0006	0.0009	–	–	–
Bi	0.0003	0.00039	0.0003	0.0000–0.0020	0.0000–0.0030	0.0000–0.0010
As	0.0006	0.0005	0.0005	–	–	–
P	0.0018	0.0030	0.0023	–	–	–
Cd	0.00002	0.0000	0.00002	–	–	–
Cr	0.0004	0.0005	0.0002	–	–	–
Mn	0.00029	0.00035	0.0005	–	–	–
Sb	0.0000	0.0004	0.0006	0.0000–0.0050	0.0000–0.0500	0.0000–0.0020
Ag	0.000685	0.00105	0.00089	–	–	–
S	0.000005	0.00101	0.0004	0.0000–0.0100	0.0000–0.0100	0.0000–0.0040
Se	0.0002	0.0006	0.00014	–	–	–
Co	0.00007	0.0006	0.0000	–	–	–
Te	0.002	0.005	0.0000	–	–	–
Al	0.004	0.0000	0.0000	–	–	–
Zr	0.000165	0.000167	0.000164	–	–	–
Au	0.0003	0.0000	0.0001	–	–	–
Pt	0.0000	0.00001	0.00009	–	–	–
Rh	0.0005	0.00083	0.0009	–	–	–
Ru	0.0026	0.0004	0.0023	–	–	–
				–0.3826	–0.5686	0.0296

2) никель (Ni) в меди незначительно снижает электропроводность и повышает ее антикоррозионные свойства. Данные таблицы указывают, что металл дефектного и нового провода содержит 0,007% никеля соответственно, а старого провода — 0,015%, что превышает предельно допустимые значения концентрации никеля 0,002% для меди марки М1 по ГОСТ 55647-2018;

3) олово (Sn), прекрасно растворяясь в меди, не ухудшает ее механические свойства, но сильно снижает ее электропроводность и повышает температуру рекристаллизации при отжиге, что при несоблюдении температурных режимов может способствовать сохранению повышенной хрупкости наклепанного слоя провода, возникающего после прокатки. Спектральный анализ позволил установить, что в металле дефектного провода содержание олова составляет 0,0152% и превышает предельно допустимые значения 0,002% в 7,6 раза;

4) свинец (Pb), не растворяясь в меди в твердом состоянии, существенно снижает пластичность меди при высоких температурах, а, как видно из таблицы, в металле дефектного провода концентрация свинца максимальна и составляет 0,0032%, что могло стать причиной ускоренного разрушения провода, тогда как в марке меди нового и старого проводов ее содержание составляет 0,0017 и 0,0006% соответственно;

5) сурьма (Sb), образуя с медью химическое соединение Cu_2Sb , повышает прочность меди, но снижает электропроводность, а, как видно из таблицы, в дефектном проводе содержание сурьмы не обнаружено в отличие от нового и старого проводов, в металле которых содержание сурьмы составляет 0,0004 и 0,0006%.

По результатам исследований можно выделить несколько вероятных причин разрушения провода:

- низкое качество металла для изготовления контактного провода, наличие примесей, снижающих механические свойства металла;
- усталость металла провода вследствие длительной эксплуатации;
- поверхностный дефект (трещина) в углублении канавки, возникающий в результате превышения усилия затяжки болтов крепления зажимов провода, которое способствует пластической деформации металла (рис. 4) и изменению размеров провода в поперечном сечении с последующей потерей конструкционной прочности, разрывами и разрушением.

Полученные результаты целесообразно учитывать при разработке стандартов и технических условий на изготовление контактных проводов с целью снижения вероятности повреждения элементов системы тягового электроснабжения.

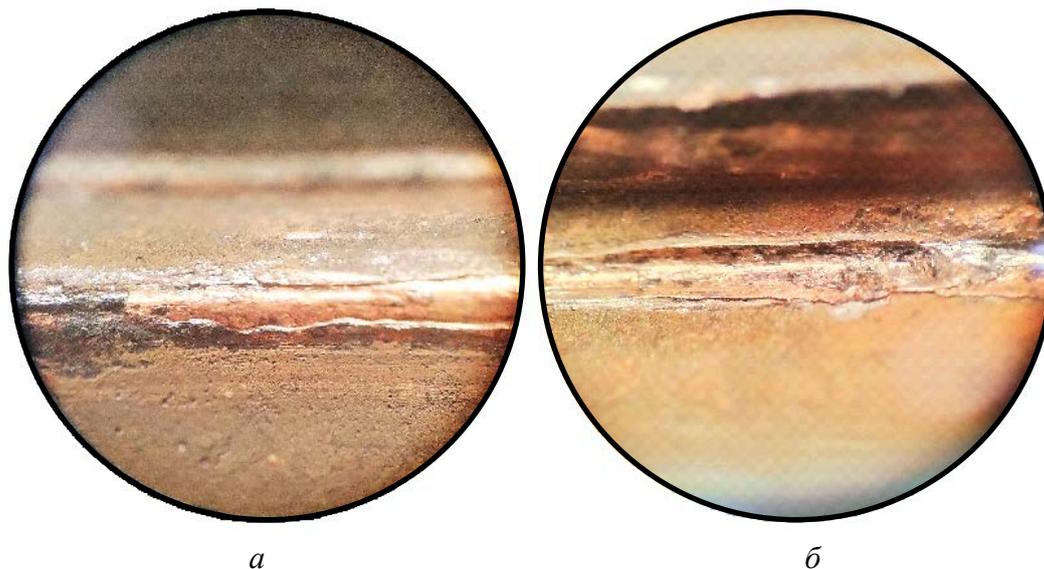


Рис. 4. Следы пластической деформации в углублении канавки, возникающие в местах крепления зажимов провода: *а* — левая канавка; *б* — правая канавка

Библиографический список

1. ГОСТ 32679-2014. Контактная сеть железной дороги. Технические требования и методы контроля = Contact line for railway. Technical requirements and control methods: межгосударственный стандарт: введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 09 октября 2014 г. № 1285-ст : введен впервые : дата введения 2015-09-01 / разработан Научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта (ВНИИЖТем). М.: Стандартинформ, 2015. 20 с.

2. Работа устройств контактной сети в условиях эксплуатации [Электронный ресурс]. URL: <http://scbist.com/zh-d-stati/7506-statya-rabota-ustroistv-kontaktnoi-seti-v-usloviyah-ekspluatacii.html>

3. Средства диагностики устройств контактной сети [Электронный ресурс]. URL: <https://helpiks.org/1-103195.html>

Дата поступления: 20.04.2024

Решение о публикации: 25.05.2024

Контактная информация:

ТАРАБИН Игорь Валерьевич — канд. техн. наук, доцент; igor_tarabin@mail.ru

МУРАВЬЕВ Дмитрий Валерьевич — канд. техн. наук, доцент; mdvomsk@yandex.ru

КРЕМЛЕВ Иван Александрович — канд. техн. наук, доцент; ivkreml@mail.ru

ТЕРЕХИН Илья Александрович — канд. техн. наук, доцент; terekhin@pgups.ru

Identification of the causes of contact wire fracture on the elements of sectionalizing devices using fractographic study and spectral analysis

I. V. Tarabin¹, D. V. Muravyev¹, I. A. Kremlev¹, I. A. Terekhin²

¹ Omsk State University of Railway Engineering, 35 Marx Ave., Omsk, 644046, Russia

² Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Tarabin I. V., Muravyev D. V., Kremlev I. A., Terekhin I. A.* Identification Of The Causes Of Contact Wire Fracture On The Elements Of Sectionalizing Devices Using Fractographic Study And Spectral Analysis // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 2. P. 42–50. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-02-42-50

Abstract

Objective: to establish the causes of the fracture of the arc-extinguishing horns of the sectional insulators of the contact network. **Methods:** fractographic analysis of the fracture surface and spectral analysis of the wire. **Results:** the paper presents the results of the fractographic analysis of the fracture surface and spectral analysis of the wires of the contact network. **Practical significance:** the research results will be used in the development of technical specifications for the manufacture of contact shaped wires, as well as requirements for the installation and adjustment of sectional insulators.

Keywords: sectional insulator, coupling, arc-extinguishing horn, contact wire, fractographic study, spectral analysis, current collector.

References

1. GOST 32679-2014. Kontaknaya set' zheleznoj dorogi. Tekhnicheskie trebovaniya i metody kontrolya = Contact line for railway. Technical requirements and control methods: mezhgosudarstvennyj standart: vveden v dejstvie Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskemu regulirovaniyu i metrologii ot 09 oktyabrya 2014 g. № 1285-st: vveden v pervye: data vvedeniya 2015-09-01 / razrabotan Nauchno-issledovatel'skim institutom zheleznodorozhnogo transporta (VNIIZHTem). M.: Standartinform, 2015. 20 s. (In Russian)
2. Rabota ustrojstv kontaktnoj seti v usloviyah ekspluatacii [Elektronnyj resurs]. URL: <http://scbist.com/zh-d-stati/7506-statya-rabota-ustroistv-kontaktnoi-seti-v-usloviyah-ekspluatacii.html> (In Russian)
3. Sredstva diagnostiki ustrojstv kontaktnoj seti [Elektronnyj resurs]. URL: <https://helpiks.org/1-103195.html> (In Russian)

Received: 20.04.2024

Accepted: 25.05.2024

Author's information:

Igor V. TARABIN — PhD in Engineering, Associate Professor; igor_tarabin@mail.ru

Dmytrii V. MURAVIEV — PhD in Engineering, Associate Professor; mdvomsk@yandex.ru

Ivan A. KREMLEV — PhD in Engineering, Associate Professor; ivkreml@mail.ru

Ilya A. TEREKHIN — PhD in Engineering, Associate Professor; terekhin@pgups.ru