

Научная статья
УДК 614.841.2.001.2
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.50.19.002

Научно обоснованная методика экспертного исследования повреждений алюминиевых проводов и кабелей после пожаров

Анна Васильевна Мокряк

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Анна Васильевна Мокряк *tokryakanna@mail.ru*

Аннотация. Статья посвящена решению актуальной проблемы в области пожарно-технической экспертизы – разработке научно обоснованного подхода к дифференциации повреждений алюминиевых проводников. Целью исследования является создание методики для надежного разграничения дефектов, вызванных аварийными режимами работы электрооборудования (короткое замыкание, сверхток, большое переходное сопротивление), и повреждений, возникших под воздействием тепла пожара. Актуальность работы обусловлена широким применением алюминия в энергетике, его специфическими свойствами (низкая температура плавления, активное окисление) и недостаточной разработанностью соответствующих диагностических критериев по сравнению с медными проводниками. В основе исследования лежит комплекс, включающий моделирование различных аварийных и термических воздействий на образцы с последующим анализом с использованием современных методов, таких как сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) и металлографии. В результате систематизирован комплекс диагностических признаков для каждого вида воздействия и разработана пошаговая методика экспертного исследования, регламентирующая последовательность действий от макроскопического осмотра до микроструктурного анализа. Практическая значимость работы заключается в создании инструмента для повышения достоверности, объективности и доказательной базы заключений при установлении электротехнической причины возникновения пожара.

Ключевые слова: алюминиевые проводники, пожарно-техническая экспертиза, дифференциация повреждений, короткое замыкание, сверхток, большое переходное сопротивление, сканирующая электронная микроскопия, металлографический анализ, методика, типы кабелей

Для цитирования: Мокряк А.В. Научно обоснованная методика экспертного исследования повреждений алюминиевых проводов и кабелей после пожаров // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 4 (39). С. 314-322.
<https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.50.19.002>.

Original article.

A scientifically based method of expert investigation of damage to aluminum wires and cables after fires

Anna V. Mokryak

Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author: Anna V. Mokryak, mokryakanna@mail.ru

Abstract. The article is devoted to solving an urgent problem in the field of fire-technical expertise – the development of a scientifically based approach to the differentiation of damage to aluminum conductors. The aim of the study is to create a methodology for reliable differentiation of defects caused by emergency modes of operation of electrical equipment (short circuit, overcurrent, high transient resistance) and damage caused by the heat of a fire. The relevance of the work is due to the widespread use of aluminum in the energy industry, its specific properties (low melting point, active oxidation) and the lack of development of appropriate diagnostic criteria in comparison with copper conductors. The research is based on a complex that includes modeling of various emergency and thermal effects on samples, followed by analysis using modern methods of scanning electron microscopy (SEM), X-ray fluorescence analysis (XFA) and metallography. As a result, a set of diagnostic features for each type of exposure has been systematized and a step-by-step expert research methodology has been developed that regulates the sequence of actions from macroscopic examination to microstructural analysis. The practical significance of the work is to create a tool to increase the reliability, objectivity and evidence base of conclusions when determining the electrical cause of a fire.

Keywords: aluminum conductors, fire technical expertise, damage differentiation, short circuit, overcurrent, high transient resistance, scanning electron microscopy, metallographic analysis, methodology, cable types

For citation: Mokryak A.V. A scientifically based method of expert investigation of damage to aluminum wires and cables after fires // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2025. № 4 (39). С. 314-322. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.50.19.002>.

Введение

Алюминиевые проводники занимают ключевое место в энергетической инфраструктуре благодаря оптимальному сочетанию легкости, коррозионной стойкости и экономической эффективности. Однако их широкое применение сопряжено с повышенной пожарной опасностью, обусловленной, в частности, высокой чувствительностью к перегреву по сравнению с медными проводниками. Согласно данным Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны (ВНИИПО) МЧС России, электротехнические неисправности стабильно занимают одну из лидирующих позиций среди причин возникновения пожаров [1-5], а их количество демонстрирует устойчивую тенденцию к росту.

Особую значимость проблема пожаров приобретает на объектах топливно-энергетического комплекса (ТЭК), где подобные инциденты ведут не только к масштабным материальным потерям, но и к серьезным социально-экономическим последствиям. В период с 2019 по 2024 год на объектах ТЭК было зарегистрировано около 643 пожаров, среди которых выделяются несколько наиболее масштабных.

К ним относится авария на ТЭЦ-3 в Новосибирске (2019 г.) — крупное происшествие в распределительном устройстве, сопровождавшееся мощным возгоранием и взрывом. Результатом стали веерные отключения электроэнергии в нескольких районах города, нарушение работы транспорта и систем жизнеобеспечения. Расследование показало, что причиной послужило короткое замыкание в силовом трансформаторе, вызванное дефектом изоляции, вероятно, существовавшим с момента изготовления оборудования.

Еще одним случаем стали пожары в Курганской области в 2023 году. Причиной возникновения пожаров стал перехлест проводов воздушных линий электропередачи (ЛЭП). Сильный ветер привел к схлестыванию проводов, что вызвало короткое замыкание и интенсивное искрообразование. Горящие частицы, падая на сухую траву, моментально инициировали новые очаги возгорания на обширной территории.

Схожим по значимости инцидентом стал пожар на ТЭЦ в Приморском крае (2024 г.). Возгорание на этой ключевой подстанции, обеспечивающей электроснабжение большого района Владивостока и других населенных пунктов, привело к прекращению электроснабжения десятков тысяч человек и объектов инфраструктуры. Причиной аварии стала перегрузка оборудования в период аномально холодной погоды, когда температуры опускались ниже -20°C . Резкий рост энергопотребления из-за массового использования обогревателей привел

к перегрузке и последующему возгоранию одного из силовых трансформаторов.

Ключевой проблемой в этой области является установление причинно-следственной связи: явился ли аварийный режим работы электросети причиной возгорания или его следствием. Решение этой задачи осложняется тем, что существующие методики экспертного исследования в значительной степени ориентированы на анализ медных проводников, в то время как диагностика повреждений алюминиевых проводов и кабелей разработана недостаточно [6-8]. Это связано с физико-химическими свойствами алюминия: его низкая температура плавления (660°C), склонность к интенсивному окислению и формированию сложных микроструктур при термическом воздействии приводят к тому, что традиционные визуальные методы зачастую не позволяют провести надежную дифференциацию [9-11].

Особую сложность представляет многообразие типов алюминиевых кабелей и соединений, используемых в энергетике, каждый из которых обладает уникальными конструктивными особенностями. К ним относятся соединительные муфты и контактные соединения, самонесущие изолированные провода (СИП), бронированные кабели, кабельные наконечники, омедненные алюминиевые проводники, а также соединения алюминия с медью. Поведение этих объектов в аварийных режимах и характер формирующихся на них повреждений существенно различаются, что до сих пор не находило системного отражения в методической литературе. Отсутствие единого подхода, учитывающего эти нюансы, затрудняет работу экспертов и снижает достоверность выводов.

Таким образом, целью настоящего исследования является разработка научно обоснованной комплексной методики экспертного исследования, позволяющей достоверно дифференцировать повреждения алюминиевых проводов и кабелей, вызванные аварийными режимами, от повреждений, вызванных внешним пожаром, с учетом специфики различных типов кабельной продукции и соединений.

Методология исследования

Исследование основывалось на комплексном подходе, объединяющем теоретический анализ, экспериментальное моделирование и диагностику. Для обеспечения достоверности результатов объектами исследования были выбраны наиболее распространенные в энергетике типы алюминиевых проводников: провода сечением от 2 до 25 мм², многопроволочные жилы самонесущих изолированных проводов (СИП), образцы бронированных кабелей, а также различные типы соединений – болтовые наконечники, биметаллические (омедненные) проводники и соединения алюминия с медью [12-14].

Моделирование аварийных режимов работы электросети на алюминиевых проводниках проводилось на специализированном электротехническом стенде.

Конструкция стенда обеспечивает высокую точность измерений и чувствительность, простоту эксплуатации, а также позволяет воспроизводить широкий спектр аварийных ситуаций:

– Сверхток: На алюминиевые проводники разных сечений и конструкций (включая отдельные проволоки СИП) подавали токи от 60 до 600 А. Фиксировали время до разрушения, характер повреждений и термические поля.

– Короткое замыкание: Имитировали дуговой процесс, характерный для металлических КЗ, на различных участках кабелей, включая зоны соединений (Рис.1).



Рис.1. Эксперимент по прохождению по образцу сверхтока и короткого замыкания

– Большое переходное сопротивление (БПС): В болтовых соединениях, клеммах и зонах контакта «жила-наконечник» намеренно создавали условия плохого контакта и пропускали через них сверхтоки для моделирования развития электроэрозии (Рис.2).



Рис.2. Эксперимент по прохождению по образцу большого переходного сопротивления

– Тепловое воздействие: Проводники и кабели в различной изоляции (ПВХ, СИП) нагревали в муфельной печи и открытым пламенем горелки для имитации условий внешнего пожара (Рис.3).



Рис.3. Эксперимент по имитации условий внешнего теплового воздействия пожара

Для анализа образцов использовали комплекс взаимодополняющих методов, адаптированных для исследования специфики каждого типа проводников и соединений:

- Визуальный осмотр и макрофотосъемка для выявления общих закономерностей повреждений.
- Сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) для изучения морфологии поверхности с высоким разрешением (до 4000х), что особенно критично для анализа ячеистой структуры при сверхтоке, микропор при КЗ и лунок при БПС.
- Рентгенофлуоресцентный анализ (РФЛА) в составе СЭМ для определения элементного состава в повреждённых зонах, что является ключевым для доказательства массопереноса в соединениях разнородных металлов.
- Металлографический анализ для изучения изменений микроструктуры металла (размера и формы зёрен), включая переходные зоны.

Результаты и обсуждение

Проведенные исследования позволили не только установить общие диагностические признаки аварийных режимов, представленные в Табл.1, но и выявить специфические нюансы, характерные для различных типов алюминиевых кабелей и соединений, что имеет принципиальное значение для практики экспертизы.

Табл.1. Диагностические признаки аварийных режимов для алюминиевых проводников

Аварийный режим / Вид воздействия	Макроскопические (визуальные) признаки	Микроскопические признаки (СЭМ, металлография)
Номинальный ток (нормальный режим)	–	Мелкозернистая структура. Преобладает α -Al матрица. Равномерно распределённые вторичные фазы
Сверхток (перегрузка)	Зависят от кратности и времени: 1,5-3 кр. (150-600 с): оплавление изоляции изнутри; 4-8 кр. (8-50 с): поверхность проводника окисленная и матовая; >9 кр. (<8 с): хрупкий излом или локальные оплавления	Универсальный признак: ячеистая структура на торце излома (1000х). Металлография: → рост среднего размера зерна с 12,6 мкм при токе 60 А до максимального значения 23,7 мкм при 328 А; → резкое уменьшение размера зерна до 7,2 мкм при 600 А
Короткое замыкание (КЗ)	Локальные оплавления на концах	КЗ ДО пожара: ячеистая структура с порами. КЗ ВО ВРЕМЯ пожара: плотная структура без пор, примеси продуктов горения
Большое переходное	Локальное оплавление в зоне	Углубления полусферической формы

сопротивление (БПС)	контакта. Признаки диффузии металлов (например, желтые пятна меди на алюминии)	(лунки). Обнаружение посторонних элементов (Zn, Fe, Cu, Sn) на алюминии – доказательство массопереноса
Внешнее тепловое воздействие	Тепловое расширение, трещины. Волнообразные наплывы	Отсутствие ячеистой структуры. Рельефные элементы (полосы, складки) на изломе. Зёрна плотные, без пор

Специфические диагностические признаки для различных типов объектов:

Соединительные муфты и контактные соединения: Ключевые критерии – массоперенос элементов (Fe, Zn, Cu на алюминии, выявляемый РФЛА) и наличие лунок полусферической формы на поверхности, свидетельствующих о локальном высокотемпературном воздействии, аналогичном дуге КЗ, но в условиях плохого контакта.

Самонесущие изолированные провода (СИП): На отдельных проволоках СИП при сверхтоке также формируется ячеистая структура в зоне разрыва. Анализ изоляции критически важен: карбонизация с внутренней стороны указывает на перегрев от сверхтока, в то время как внешнее тепловое воздействие приводит к иному характеру повреждения.

Бронированные кабели: Броня обладает тепловой инерцией, что необходимо учитывать при оценке термического воздействия на жилы. Исследование самой брони на предмет локального перегрева может служить индикатором очага.

Кабельные наконечники и соединения алюминия с медью: Решающим доказательством БПС является массоперенос. Обнаружение меди на алюминиевой жиле и алюминия на медном наконечнике в зоне контакта с помощью РФЛА – признак аварийного режима. При внешнем тепловом воздействии образуется гетерогенная структура интерметаллидов.

На основе выявленного комплекса общих и специфических диагностических критериев была разработана научно обоснованная методика экспертного исследования, представляющая собой последовательных действий, представленный на Рис.4. Данная методика регламентирует путь от макроскопического осмотра до применения инструментальных методов анализа с учетом типа исследуемого кабельного изделия, что обеспечивает комплексный и объективный подход к установлению причины повреждения.



Рис.4. Блок-схема комплексной методики экспертного исследования поврежденных алюминиевых проводов и кабелей

Эффективность методики обусловлена ее научной базой, комплексным подходом и применением взаимодополняющих методов. Учет специфики различных типов кабелей и соединений повышает ее дифференцирующую способность и практическую ценность. Внедрение методики в практику экспертов стандартизирует процесс исследования, снижает субъективность и значительно увеличивает достоверность выводов.

Заключение

В результате проведенного исследования разработана научно обоснованная комплексная методика экспертного исследования, представляющая собой эффективный инструмент для решения сложной задачи дифференциации поврежденных алюминиевых проводников после пожаров.

Установлен и систематизирован комплекс общих диагностических признаков (макро-, микроскопических, металлографических и элементных), но и детализированы ключевые диагностические признаки для основных типов кабельной продукции и соединений: соединительных муфт, СИП, бронированных кабелей, наконечников, омедненных алюминиевых проводников и соединений алюминия с медью.

Предложенная методика регламентирует четкую последовательность действий эксперта, обеспечивая комплексный подход, объективность исследования и учет конструктивных особенностей исследуемого объекта на всех этапах – от отбора образцов до синтеза результатов. В методику впервые заложен дифференцированный подход к анализу широкой номенклатуры алюминиевых кабелей и соединений.

Результаты исследования вносят существенный вклад в повышение пожарной безопасности объектов энергетики и открывают перспективы для дальнейших изысканий в области диагностики повреждений электротехнических изделий из других материалов и в различных условиях эксплуатации.

Список источников

1. Пожары и пожарная безопасность в 2019 году: статистический сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко - М.: ВНИИПО. – 2020. – 125 с.
2. Пожары и пожарная безопасность в 2020 году: статистический сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко - М.: ВНИИПО. – 2021. – 112 с.
3. Пожары и пожарная безопасность в 2021 году: статистический сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко - М.: ВНИИПО. – 2022. – 114 с.
4. Пожары и пожарная безопасность в 2022 году: статистический сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко - М.: ВНИИПО. – 2023. – 80 с.
5. Пожары и пожарная безопасность в 2023 году: статистический сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко - М.: ВНИИПО. – 2024. – 110 с.
6. Мокряк А.В. Обзор и пожарная опасность алюминиевых проводников // Наукосфера. – 2023. – № 8-2. – С. 67-70.
7. Смелков Г.И. Пожарная безопасность электропроводок. – М.: ООО «КАБЕЛЬ», 2009. – 328 с.
8. Мокряк А.Ю., Мокряк А.В. Исследование металлических и электротехнических объектов судебной пожарно-технической экспертизы: монография. – СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2022. – 212 с.
9. Wang X., Wu Y., Zhao C.Z., Meng Q.S., Gao A. Analysis on Fire Risk of Aluminium Conductors under Electrical Faults in Low Voltage Circuit // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 52. – P. 408-412.
10. Черкасов В.Н., Харламенков А.С. Почему в настоящее время медные проводники предпочтительнее алюминиевых // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т. 26. – № 7. – С. 76-77.
11. Митричев Л.С., Колмаков А.И., Степанов Б.В. и др. Исследование медных и алюминиевых проводников в зонах короткого замыкания и термического воздействия: Методические рекомендации. – М.: ВНИИ МВД СССР, 1986.
12. Pan G., Gao W., Zhao C.Z., Di M. Comprehensive identification technology about electric fire // Journal of Fire Science and Technology. – 2005. – Vol. 24(4). – P. 495-497.
13. Тихонова И.В., Кузовлева О.В., Роот Е.А., Гвоздев А.Е. Влияние короткого замыкания и термического воздействия на микроструктуру медных и алюминиевых проводников // Взаимодействие дефектов и неупругие явления в твердых телах. – Тула: Тульский государственный университет, 2007. – С. 49.
14. Рид С.Дж.Б. Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия. – М.: Техносфера, 2008. – 232 с.

References

1. Gordienko, D.M. (Ed.). (2020). Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2019 godu: statisticheskii sbornik [Fires and fire safety in 2019: Statistical collection]. VNIIPPO.
2. Gordienko, D.M. (Ed.). (2021). Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2020 godu: statisticheskii sbornik [Fires and fire safety in 2020: Statistical collection]. VNIIPPO.
3. Gordienko, D.M. (Ed.). (2022). Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2021 godu: statisticheskii sbornik [Fires and fire safety in 2021: Statistical collection]. VNIIPPO.

4. Gordienko, D.M. (Ed.). (2023). Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2022 godu: statisticheskii sbornik [Fires and fire safety in 2022: Statistical collection]. VNIPO.
5. Gordienko, D.M. (Ed.). (2024). Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2023 godu: statisticheskii sbornik [Fires and fire safety in 2023: Statistical collection]. VNIPO.
6. Mokryak, A.V. (2023). Obzor i pozharnaya opasnost' alyuminievykh provodnikov [Review and fire hazard of aluminum conductors]. Naukosfera, (8-2), 67–70.
7. Smelkov, G.I. (2009). Pozharnaya bezopasnost' elektroprovodok [Fire safety of electrical wiring]. ООО "KABEL".
8. Mokryak, A.Yu., & Mokryak, A.V. (2022). Issledovanie metallicheskih i elektrotekhnicheskikh ob"ektov sudebnoi pozharno-tekhniceskoi ekspertizy: monografiya [Study of metal and electrical objects of forensic fire-technical examination: A monograph]. Sankt-Peterburgskii universitet GPS MChS Rossii.
9. Wang, X., Wu, Y., Zhao, C.Z., & Meng, Q.S. (2013). Analysis on fire risk of aluminium conductors under electrical faults in low voltage circuit. Procedia Engineering, 52, 408–412. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.161>.
10. Cherkasov, V.N., & Kharlamenkov, A.S. (2017). Pochemu v nastoyashchee vremya mednye provodniki predpochtel'nee alyuminievykh [Why copper conductors are currently preferable to aluminum ones]. Pozharovzryvobezopasnost', 26(7), 76–77.
11. Mitrichev, L.S., Kolmakov, A.I., Stepanov, B.V., & [others]. (1986). Issledovanie mednykh i alyuminievykh provodnikov v zonakh korotkogo замыкания i teplovogo vozdeistviya: Metodicheskie rekomendatsii [Study of copper and aluminum conductors in short circuit zones and thermal exposure: Guidelines]. VNI MVD SSSR.
12. Pan, G., Gao, W., Zhao, C.Z., & Di, M. (2005). Comprehensive identification technology about electric fire. Journal of Fire Science and Technology, 24(4), 495–497.
13. Tikhonova, I.V., Kuzovleva, O.V., Root, E.A., & Gvozdev, A.E. (2007). Vliyanie korotkogo замыкания i teplovogo vozdeistviya na mikrostrukturu mednykh i alyuminievykh provodnikov [Influence of short circuit and thermal exposure on the microstructure of copper and aluminum conductors]. In Vzaimodeistvie defektov i neuprugie yavleniya v tverdykh telakh (pp. 49–53). Tul'skii gosudarstvennyi universitet.
14. Reed, S.J. B. (2008). Elektronno-zondovyi mikroanaliz i rastrovaya elektronnaya mikroskopiya [Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy]. Tekhnosfera. (Original work published 2005).

Статья поступила в редакцию 14.11.2025, одобрена после рецензирования 15.12.2025, принята к публикации 20.12.2025.

The article was submitted 14.11.2025, approved after reviewing 15.12.2025, accepted for publication 20.12.2025.