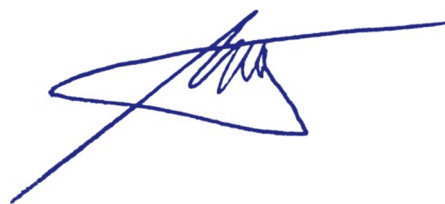


На правах рукописи



Мокряк Андрей Юрьевич

**УСТАНОВЛЕНИЕ ПРИРОДЫ ОПЛАВЛЕНИЙ
МЕДНЫХ ПРОВОДНИКОВ И ЛАТУННЫХ ТОКОВЕДУЩИХ
ИЗДЕЛИЙ ПРИ ЭКСПЕРТИЗЕ ПОЖАРОВ
НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ**

05.26.03 - Пожарная и промышленная безопасность
(технические науки, отрасль энергетика)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России.

Научный руководитель

Чешко Илья Данилович

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ

Официальные оппоненты

Смелков Герман Иванович

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
главный научный сотрудник отдела пожарной
безопасности электрических изделий Научно-
исследовательского центра нормативно-
технических проблем пожарной безопасности
ФГБУ ВНИИПО МЧС России

Пичужкин Сергей Александрович

кандидат технических наук,
начальник сектора НПК-3 НИЦ
«Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ
«Прометей»

Ведущая организация

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра
Великого»

Защита состоится 22 мая 2018 года в 14 час. 00 мин на заседании диссертационного совета Д 205.002.02 на базе Академии Государственной противопожарной службы МЧС России (129366, Москва, улица Бориса Галушкина, дом 4).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии ГПС МЧС России и на сайте:

<http://academygps.ru/upload/iblock/1d9/1d9b1d60eb8ca56c74252bc798ef17f3.pdf>

Автореферат диссертации разослан 21 марта 2018 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 205.002.02

А.Б. Сивенков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Линии электропередач являются важнейшими компонентами электроэнергетики – отрасли, охватывающей сферы производства электроэнергии и ее доставки до потребителя. К сожалению, провода и кабели, обеспечивающие эту доставку, относятся к числу наиболее пожароопасных изделий, поскольку в них сочетается горючая среда (электроизоляция, оболочки кабелей и др.) и источники зажигания (искры, дуги, нагретые электрическим током детали и т.п.), появляющиеся при работе электрооборудования в аварийных режимах. Такие режимы возникают во всех электросетях, начиная от бытовой сферы до крупных энергопроизводителей и других объектов энергетики. В промышленно развитых странах, в том числе и в России, доля пожаров от электротехнической продукции ежегодно составляет от 15 до 25 %. По всем видам электротехнической продукции первое место по числу пожаров с большим опережением занимают изделия кабельной промышленности (провода и кабели) в комплексе с другими компонентами электросетей.

Основными аварийными режимами, приводящими к возникновению загораний кабелей, являются электродуговые режимы, а также режимы сверхтоков, которые могут иметь место при коротких замыканиях (КЗ) или перегрузках. Наиболее изученным электрическим пожароопасным режимом, как с пожарно-профилактической, так и экспертно-криминалистической точек зрения, является КЗ. Первые работы по экспертному криминалистическому исследованию возникающих при коротких замыканиях дуговых оплавлений были опубликованы В. Хагемайером в шестидесятых годах прошлого века. Во Всесоюзном научно-исследовательском институте противопожарной обороны МВД СССР (ВНИИПО МВД СССР) под руководством профессора Г.И. Смелкова была разработана теоретическая основа (методология) установления причастности электрических аварийных режимов к возникновению пожара, создана и практически реализована первая отечественная инструментальная методика установления момента возникновения КЗ на медных и алюминиевых проводах, позволяющая дифференцировать дуговые оплавления, возникшие в результате так называемых «первичных» и «вторичных» КЗ. Свое развитие методика получила в работах Всесоюзного научно-исследовательского института МВД СССР (ВНИИ МВД СССР) и экспертно-криминалистического центра МВД России (ЭКЦ МВД России). Экспертному исследованию медных проводников после пожара также посвящены работы, в том числе при их контакте с проводниками тока, выполненными из других металлов. В комплексе с указанными методиками следует рассматривать методику экспертного

исследования следов БПС, которые возникают в электроцепях в зонах т.н. «плохих контактов» и тепловыделения которых достаточно часто являются первопричиной пожара.

Методика исследования оплавлений медных проводников является одной из самых востребованных в лабораториях экспертных подразделений МЧС и МВД России, поскольку версия о причастности к возникновению горения аварийных режимов в электропроводке отрабатывается практически на каждом пожаре. Однако, как показывает практика расследования пожаров, нередко случаи, когда результаты инструментальных исследований, а именно рентгеноструктурного и металлографического анализа, не согласуются с выводами по очагу и причине пожара. При этом, дифференцирующие признаки (форма зерна, содержание кислорода, пористость) первичного (вторичного) КЗ между медными проводниками не всегда проявляются и зачастую конфликтуют друг с другом. Применяемая на практике методика не учитывает ряд существенных факторов, оказывающих влияние на конечный вид микроструктуры оплавления медного проводника, в частности, способ прокладки электропроводки (в кабель-каналах, гофрированных пластиковых и металлических трубках), который затрудняет приток кислорода к месту КЗ; кратность тока перегрузки; длительность дугового процесса и др.

Кроме того, объектами исследования являются исключительно оплавления, которые рассматриваются как электродуговые. Известно, однако, что в случае возникновения аварийного электрического режима к пожару может привести не только воздействие дуги КЗ, но и, с не меньшей вероятностью, загорание изоляции и других горючих материалов при прохождении по проводам сверхтока перегрузки, в том числе перегрузке, возникающей при КЗ. При этом, как показали поисковые исследования, предшествующие данной работе, может происходить разрыв проводников с образованием оплавлений, визуально не отличающихся от электродуговых.

Все вышесказанное указывает на необходимость совершенствования существующих экспертных методик, поиска новых, дополнительных признаков, которые позволили бы повысить надежность и достоверность определения природы оплавлений медных проводников.

Еще одним недостатком реализуемых на практике экспертных методик является то, что они рассчитаны на исследование следов взаимодействия ограниченного круга металлов: меди с медным проводником и меди со сталью. Однако, на практике зачастую возникает необходимость выявления и анализа следов, возникших в результате взаимодействия (электродугового или вследствие воздействия высокой температуры пожара) разнородных металлов, в частности, латунных контактов с проводниками, выполненными из других металлов и сплавов - медью, сталью, алюминием.

Латунь широко применяется на объектах энергетики для изготовления контактов и других деталей электроустановочных и коммутационных изделий. Именно в этих изделиях существует повышенный риск возникновения электрических аварийных режимов. При этом сложный элементный состав латуней обуславливает неоднозначность их поведения при электрических дуговых процессах.

В настоящий момент экспертные методики анализа после пожара оплавлений проводников, выполненных из латуни, в судебной пожарно-технической экспертизе отсутствуют.

Таким образом, если рассматривать как единое целое комплекс имеющихся на вооружении пожарно-технического эксперта инструментальных методик анализа компонентов электросетей, к наиболее существенным проблемам можно отнести отсутствие методического обеспечения исследования следов прохождения сверхтоков, а также взаимодействия разнородных металлов, в первую очередь латуни с медью и др. Исследованию по этим направлениям и посвящается данная диссертационная работа.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам экспертного исследования оплавлений медных проводников на предмет установления их причастности к возникновению пожара посвящены работы отечественных авторов: Смелков Г.И., Колмаков А.И., Россинская Е.Р., Митричев Л.С., Маковкин А.В., Кабанов В.Н., Граненков Н.М., Зернов С.И., Пеньков В.В., Чешко И.Д. и др., а также ряда зарубежных исследователей - Hagemuer W., Babrauskas V., Ettling B., Beland B.

Основное внимание в работах данных авторов уделено исследованию коротких замыканий и, частично, больших переходных сопротивлений. Однако в настоящий момент в научной и специальной (экспертной) литературе отсутствуют систематические сведения о влиянии сверхтока на структуру, свойства и морфологические особенности медных проводников, изымаемых с мест пожаров.

Поведение латунных токоведущих изделий при возникновении пожароопасных аварийных режимов работы электросети, особенности формирования криминалистически значимых следов, к настоящему времени практически не изучены. Экспериментальные исследования оплавлений медных проводников и латунных изделий сверхтоками, использованными в работе методами и в данном объеме, судя по опубликованным работам, не проводились.

Цели и задачи исследования. Целью работы является разработка методических основ экспертного исследования после пожара оплавлений медных проводников токами перегрузки, а также латунных токоведущих изделий и расширение, таким образом,

аналитических возможностей комплекса инструментальных методов, используемых при установлении причин пожаров.

Для достижения поставленной цели были выполнены следующие задачи:

- разработан и введен в эксплуатацию экспериментальный электротехнический стенд для моделирования пожароопасных аварийных режимов работы электросети;
- на основе анализа экспертной практики выбраны объекты исследования;
- осуществлено моделирование пожароопасных аварийных режимов работы электросети при условиях, характерных для пожара и допожарной обстановки;
- проведен анализ различными инструментальными методами образцов, полученных в ходе проведения экспериментов, систематизированы признаки, указывающие на природу и условия формирования оплавлений токоведущих металлоизделий из меди и латуни;
- предложены аналитические схемы экспертного исследования оплавлений медных проводников и латунных токоведущих изделий после пожара;
- полученные результаты апробированы на реальных пожарах.

Объектом исследования являются оплавленные участки медных проводников и латунных токоведущих изделий.

Предмет исследования: признаки (следы) протекания аварийных пожароопасных электрических режимов работы электросети.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- выявлены и классифицированы признаки, характеризующие протекание сверхтока по медным проводникам. Проведена количественная оценка зависимости таких признаков от кратности сверхтока;
- обнаружена зависимость содержания кислорода в оплавлении медного проводника от кратности сверхтока;
- усовершенствована аналитическая схема экспертного анализа после пожара оплавлений медных проводников;
- выявлены диагностические критерии, позволяющие определить причину разрушения при пожаре латунных контактов (дифференцирующие электродуговой процесс и внешнее тепловое воздействие).

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в возможности использования ее результатов для объяснения механизма протекания физических процессов, формирующих оплавления медных проводников и латунных токоведущих изделий, научного обоснования применяемых в пожарно-технической экспертизе инструментальных методик, обоснования выводов эксперта.

Практическая значимость работы заключается в ее использовании как непосредственно в экспертной практике, так и в последующей разработке экспертных методик.

Полученные результаты использованы для совершенствования учебного процесса при подготовке экспертов судебно-экспертных учреждений Федеральной противопожарной службы МЧС России и экспертно-криминалистических центров МВД России.

Материалы диссертации реализованы:

–при производстве судебных пожарно-технических экспертиз в следующих судебно-экспертных учреждениях Федеральной противопожарной службы МЧС России по Красноярскому краю, Нижегородской области, Курганской области, Ярославской области, г. Санкт-Петербургу;

–при подготовке учебного пособия, имеющего гриф «Допущено Министерством Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий в качестве учебного пособия для высших образовательных учреждений МЧС России» (Металлографические и морфологические исследования металлических объектов судебной пожарно-технической экспертизы: учебное пособие / А.Ю. Мокряк, И.Д. Чешко, Ю.Н. Бельшина; под общ. ред. Э.Н. Чижикова. – СПб.: ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России», 2016. – 160 с., 117 ил., 16 табл., 52 библиогр.);

–при подготовке учебного пособия (Экспертное исследование оплавлений медных проводников, изъятых с места пожара: Учебное пособие / А.Ю. Мокряк, В.В. Пеньков, И.Д. Чешко и др. – М.: ЭКЦ МВД, 2016. – 80 с., 36 ил., табл., библиогр., прил.);

–при подготовке методического пособия (Экспертное исследование после пожара медных проводников / А.Ю. Мокряк, И.Д. Чешко, А.Ю. Парийская и др.), находящегося в печати.

Методология и методы исследования. Методология исследования заключается в моделировании электрических аварийных режимов в условиях, характерных пожара и для допожарной обстановки, а также выявлении корреляционных связей между физико-химическими характеристиками, образующихся при этом оплавлений и механизмом (условиями) их образования.

Для решения поставленных задач применялся визуальный морфологический анализ и следующие инструментальные методы исследования: сканирующая электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ, рентгенофлуоресцентный элементный анализ, металлографический анализ.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты исследования инструментальными методами оплавлений медных проводников и латунных токоведущих изделий, полученных в ходе моделирования пожароопасных аварийных режимов работы электросети;
- объяснения механизма формирования оплавлений, влияния факторов, сопутствующих процессу, на их геометрическую форму, структуру и свойства;
- аналитические схемы экспертного исследования оплавлений медных проводников и латунных контактных изделий.

Степень достоверности и апробация результатов. Полученные в диссертационной работе результаты соответствуют современным представлениям об электродуговых процессах и процессах, протекающих при нагреве металлов и сплавов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

- корректным применением современного, сертифицированного и поверенного измерительного оборудования с использованием компьютерного программного обеспечения, обеспечивающих необходимую точность проводимых измерений;
- значительным объемом экспериментальных данных с использованием апробированных методов их обработки;
- объективным анализом полученных научных результатов;
- воспроизводимостью результатов экспериментов.

Результаты проведенной работы успешно апробированы на реальных пожарах.

Основные результаты научной работы доложены на: V Международной научно-практической конференции «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы» (Воронеж, 2014 г.); IV Международной научной конференции «Пожарная безопасность» (НовиСад, Сербия, Высшая техническая школа, 2014 г.); V Международной научно-практической конференции «Теория и практика судебной экспертизы в современных условиях» (Москва, МГЮА им. О.Е. Кутафина, 2015 г.); VI Международной научно-практической конференции «Теория и практика судебной экспертизы в современных условиях» (Москва, МГЮА им. О.Е. Кутафина, 2017 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, отражающих основные положения исследования, из них 5 – в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы. Работа содержит 138 страниц основного текста, 18 таблиц, 90 рисунков. Список использованной литературы включает 110 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обоснована актуальность работы, ее научная новизна, степень разработанности. Определены цель и задачи исследования. Приведены основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту.

В первой главе «Пожароопасные аварийные процессы в электросетях, их последствия и методики экспертного исследования (аналитический обзор)» систематизированы сведения о пожароопасных аварийных электрических режимах, которые могут возникать в электросетях. При этом, основное внимание уделено электродуговому процессу короткого замыкания и токовой перегрузки. Проанализированы существующие на данный момент в пожарно-технической экспертизе инструментальные методики исследования оплавлений металлических проводников тока. Данные методики являются одними из наиболее востребованных и широко используемых в СПТЭ. Показаны основные существенные недостатки данных методик.

Методик экспертного анализа после пожара электротехнических изделий, выполненных из латуни в пожарно-технической экспертизе не существует. Сложность разработки таких методик, в первую очередь связана с большей, по сравнению, с медью номенклатурой металлоизделий из латуни, с вариациями возможных типов медно-цинковых сплавов и их микроструктур.

Во второй главе «Моделирование аварийных режимов работы электросети и условий пожара. Методы исследования оплавлений» приведено описание устройства экспериментального электротехнического стенда (рисунок 1), разработанного и изготовленного в рамках диссертационного исследования.

Данная установка позволяет моделировать аварийные электрические режимы работы электросети переменного и постоянного тока, напряжением 12 и 220 В - короткое замыкание и токовая перегрузка при сверхтоках до 1000 А, воспроизводить условия пожара – задымленную атмосферу, внешнее тепловое воздействие на образец до 800 °С, контролировать газовый состав атмосферы газоанализатором «Оптогаз-500».

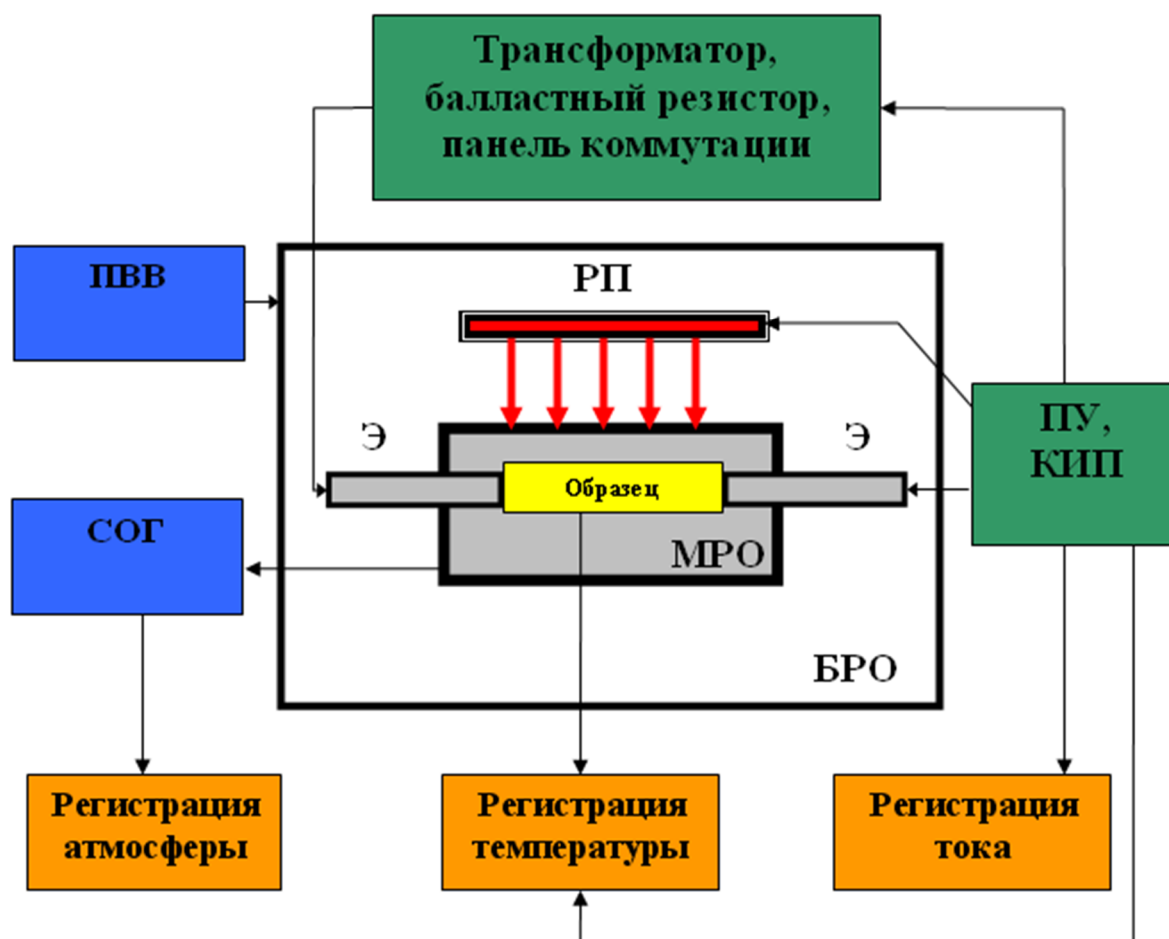


Рисунок 1 - Принципиальная схема электротехнического стенда

ПВВ – приточно-вытяжная вентиляция;

Э – электроды с зажимными контактами;

МРО – малый рабочий объем;

БРО – большой рабочий объем;

ПУ – панель управления;

КИП – контрольно-измерительные приборы;

СОГ – система охлаждения газов;

РП – радиационная панель;

Образец – медный проводник, а также иные детали электрооборудования.

Эксперименты проводили с медными многопроволочными и однопроволочными проводниками типа ВВГ, ПВС, ШВВП, МГШВ, NYM в ПВХ-изоляции площадью сечения 0,5, 0,75, 1,5 и 2,5 мм². Данные типы проводов используются при прокладке электросетей переменного тока. В качестве латунных электротехнических объектов исследования использовались обжимные контакты из латуни марки Л63. При проведении экспериментов по контакту с другими металлами использовались медные проводники (медь марки М1), алюминиевые проводники (алюминий марки АД0), стальной уголок (сталь марки Ст3).

Моделирование «неметаллического» КЗ проводилось следующим образом. Провод сначала подвергали воздействию перегрузки ограниченной кратности (3 - 4). Это приводило к нагреву изоляции и ее искусственному старению, образованию в ней дефектов. И затем уже такой "состаренный" провод подвергали перегрузке большей кратности (4 - 20), что приводило к пробое "состаренной" изоляции и возникновению КЗ.

Первичное КЗ моделировали указанным способом в нормальной атмосфере при напряжении переменного тока – 220 В, температуре окружающей среды – 20 ± 3 °С. Моделирование вторичного КЗ проводили при локальном нагреве провода радиационной панелью до температуры 300 - 400 °С в атмосфере газообразных продуктов неполного сгорания древесины, резины и тканей.

Моделирование токовой перегрузки на медных проводниках проводили в нормальной атмосфере при напряжении переменного тока – 220 В, температуре окружающей среды – 20 °С. Через образцы проводников длиной 40 – 100 см пропускали токи перегрузки различной кратности – от 2 до 20 крат с шагом в 1 крат.

Воздействие внешнего тепла пожара моделировали путем отжига образцов оплавлений проводников тока в муфельной печи при температурах от 500 до 1200 °С. Атмосферу продуктов сгорания в печи создавали сжиганием полимерных материалов. Скорость охлаждения – медленная (в печи), средняя (на воздухе), быстрая (водой).

Исследование полученных образцов оплавлений проводили визуально при увеличениях до 40 – 50^x, а также с использованием оптического микроскопа «МЕТАМ РВ-21» (увеличение от 5 до 15 крат) и компьютерной программы для анализа изображения «Image Expert Pro Nexsys». Морфологическое исследование осуществлялось на сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA\\XMU с вольфрамовым катодом и высоким вакуумом в камере. Для изучения топографии поверхности использовался SE - детектор вторичных электронов. Исследование проводили при увеличениях от 600^x до 2000^x. Рентгенофазовый анализ медных проводников проводили с использованием минидифрактометра ДР-01 «Радиян». Металлографический анализ оплавлений проводился на металлографическом микроскопе МЕТАМ ЛВ - 31 с использованием компьютерной программы для анализа изображения «Thixomet Pro» при увеличениях от 50^x до 1000^x. Рентгенофлуоресцентный анализ латунных проводников тока осуществлялся системой микроанализа INCA Energy 450 с беззотным энергодисперсионным спектрометром X-MAX 80 Oxford Instruments, а также на спектрометре СУР-02 «РЕНОМ-ФВ», снабженным SDD-детектором с охлаждением Пельтье.

В третьей главе «Анализ оплавлений медных проводников, подвергшихся воздействию сверхтока» приводятся результаты экспериментов по моделированию токовой

перегрузки на медных проводниках. При токовой перегрузке свыше 3-4 крат проводник, как правило, разделяется на части с образованием оплавлений на концах. Морфология таких оплавлений сходна с последствиями воздействия на проводник электрической дуги КЗ. При определенных значениях кратности тока перегрузки на проводниках возникали специфические дефекты: вздутия, утолщения и утончения, поверхностные оплавления (рисунки 2, 3). Даны определения этим признакам токовой перегрузки.



Рисунок 2 – Следы, образующиеся на поверхности медных проводников в результате токовой перегрузки кратностью свыше $3 \div 4$ (сечение проводников – $2,5 \text{ мм}^2$)

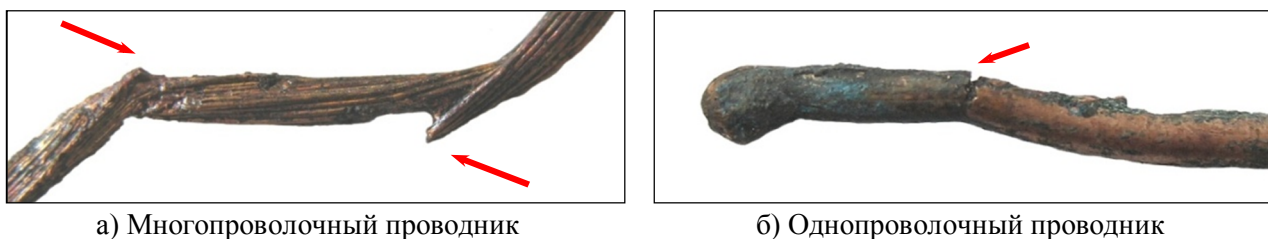


Рисунок 3 – Незавершенная фрагментация медных проводников в результате протекания токовой перегрузки кратностью свыше $3 \div 4$ (сечение проводников – $2,5 \text{ мм}^2$)

Установлено, что вздутия образуются только на проводниках в изоляции. Размеры вздутий варьируются в зависимости от кратности тока перегрузки и составляют величину в диапазоне $0,08 \div 4,12 \text{ мм}$. Количество вздутий последовательно увеличивается с возрастанием кратности токовой перегрузки (рисунок 4).

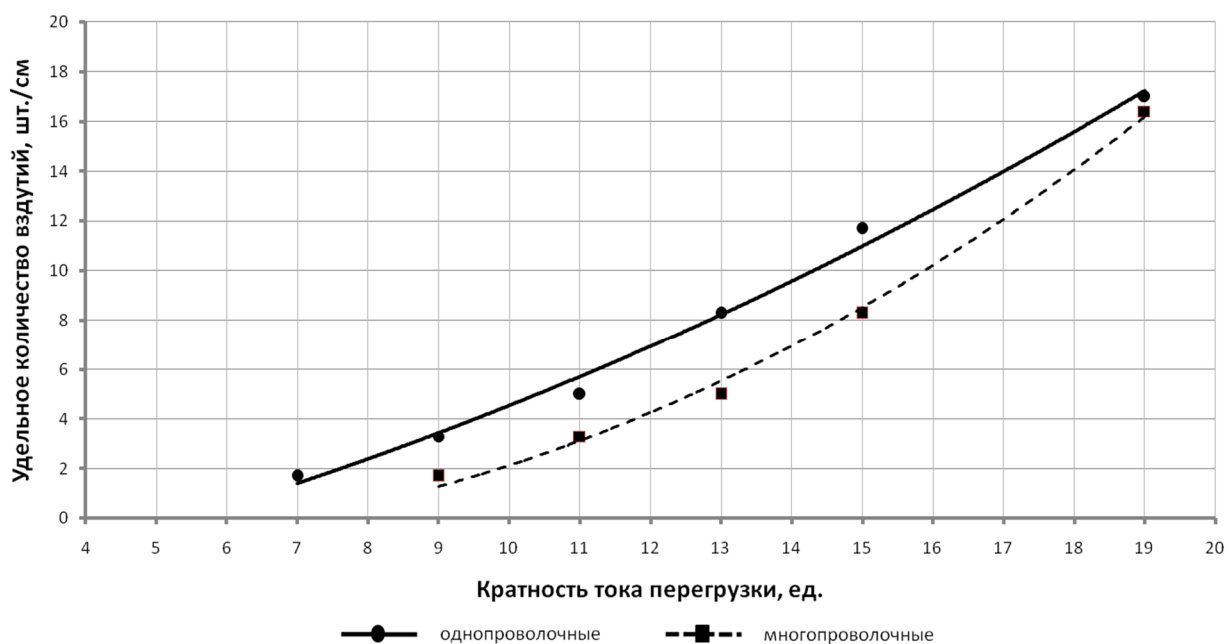


Рисунок 4 –Зависимость удельного количества вздутий на однопроволочном и многопроволочном медном проводнике от кратности тока перегрузки

Характерной особенностью микроструктуры вздутий является наличие внутри макропоры. Независимо от кратности тока перегрузки большинство вздутий представляют собой микроструктуру меди с доэвтектическим состоянием, при концентрации кислорода около 0,05 %.

Металлографический анализ оплавлений медных проводников, подвергшихся воздействию токовой перегрузки, позволил выявить признаки этого процесса: поверхностное оплавление, межпроволочное оплавление, оплавление границ зерен, специфическая пористость (рисунки 5 - 7).

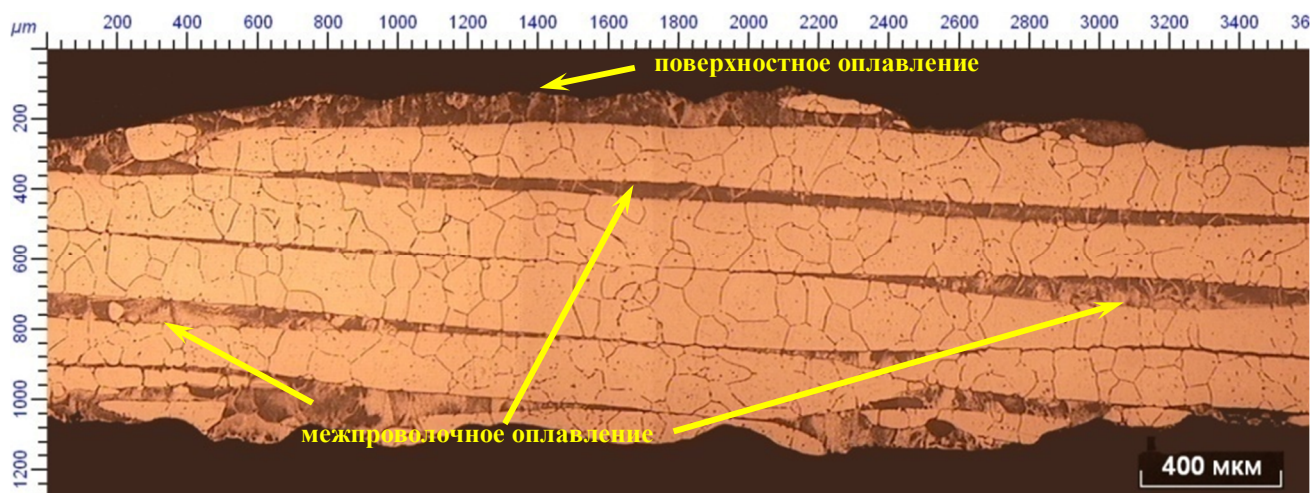
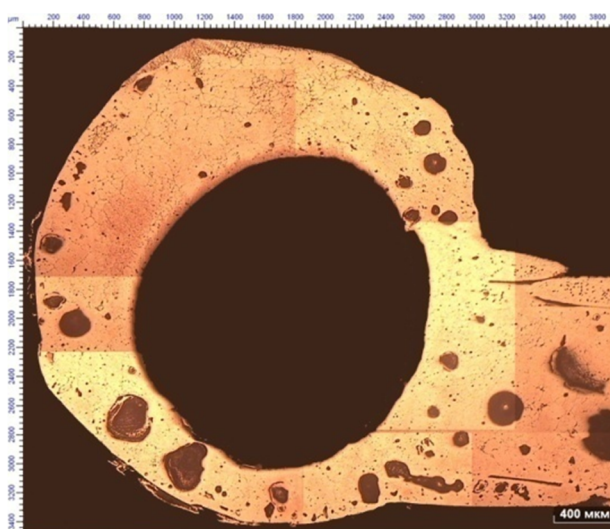
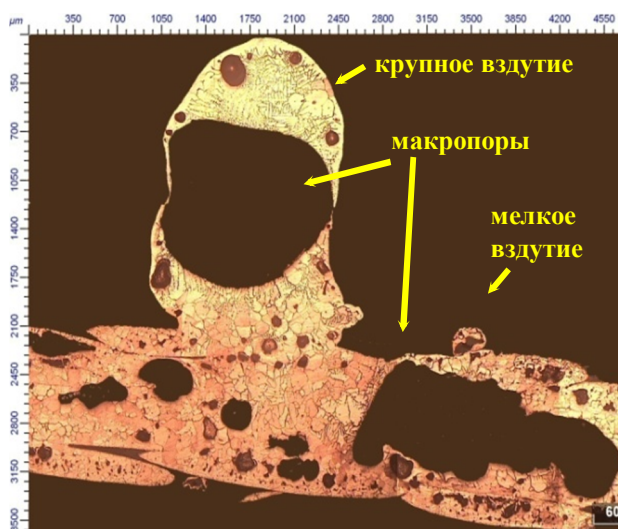


Рисунок 5 – Межпроволочное и поверхностное оплавление многопроволочного проводника при токовой перегрузке кратностью более 3÷4

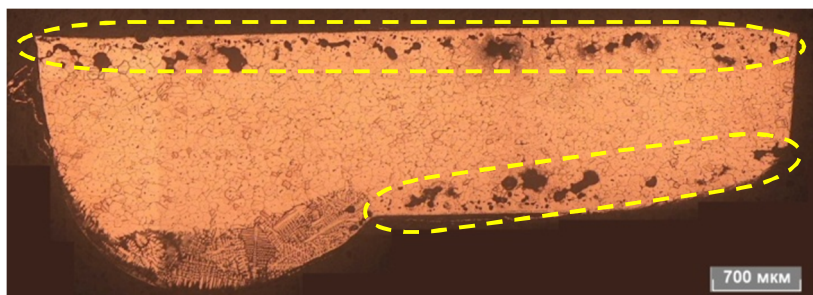


а) Макропора (в центральной части) и микропоры в оплавлении на конце медного проводника

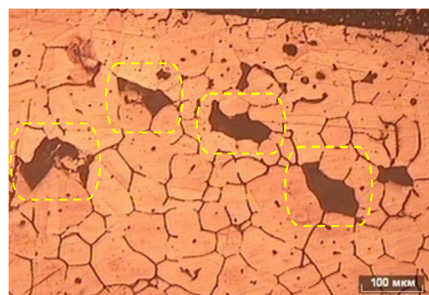


б) Макропора, расположенная во вздутии на поверхности медного проводника

Рисунок 6 – Поры, образовавшиеся в различных зонах медного проводника, при токовой перегрузке кратностью более 3÷4



а) Приповерхностный слой, в котором наблюдаются оплавления границ зерен



б) Крупный план оплавлений границ зерен

Рисунок 7 – Оплавление границ зерен в приповерхностном слое (отмечены пунктиром) нерасплавленной части медного проводника при токовой перегрузке кратностью более 3÷4

Содержание кислорода в оплавлении медного проводника, образовавшегося в результате токовой перегрузки, зависело от кратности сверхтока. При перегрузках менее 8÷9 крат содержание кислорода в зоне оплавления варьировалось от 0,10 до 0,39 % и более. При кратностях перегрузки более 8÷9 концентрация кислорода в большей части объема оплавления оставалась на исходном уровне - 0,05 % (рисунок 8).

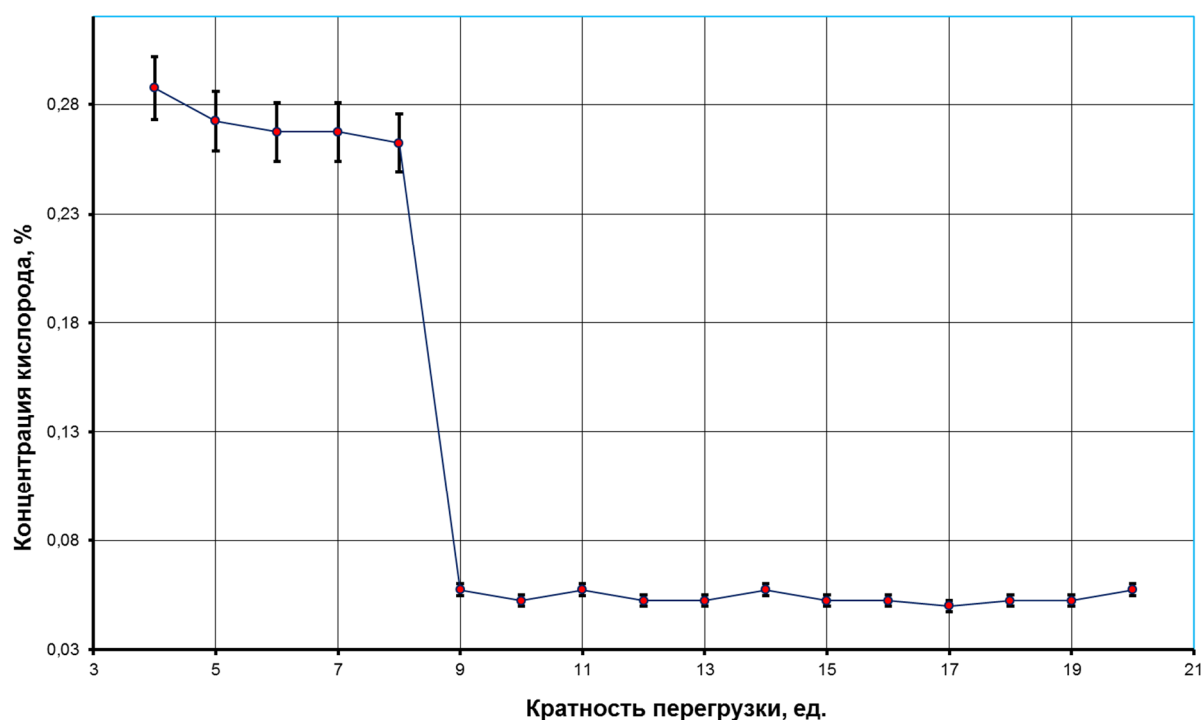
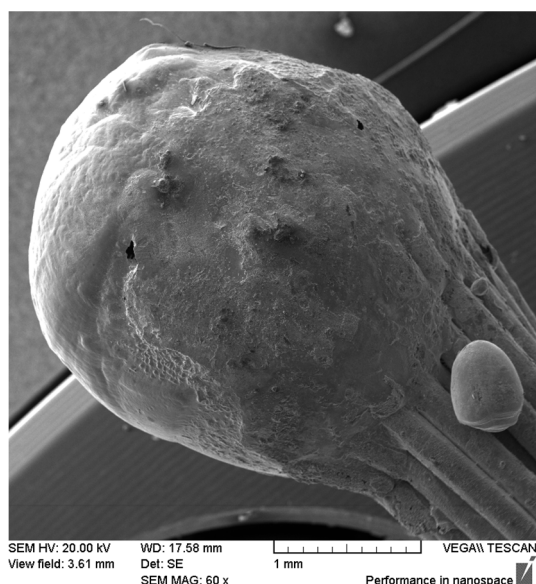


Рисунок 8 – Зависимость концентрации кислорода в оплавлении от кратности сверхтока

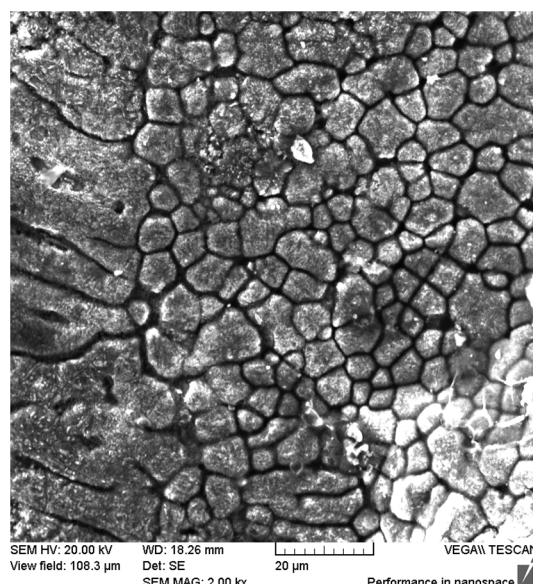
Зерна меди в оплавленных зонах при токовой перегрузке имели различную форму и ориентировку и могли быть дендритными, вытянутыми (столбчатыми) или равноосными.

Рассмотрено влияние отжига при температурах до 1100 °С на сохранность признаков токовой перегрузки, выявляемых методом металлографии.

Поверхность оплавлений медных проводников, подвергшихся токовой перегрузке, имеет характерные растрескивания (рисунок 9).



а) 50^x



б) 2000^x

Рисунок 9 – Поверхность оплавления медного проводника, подвергшегося 15 кратной токовой перегрузке

Исследована сохранность признаков, дифференцирующих ПКЗ – ВКЗ - вид структуры и толщина оксидного слоя - методом СЭМ: показано, что свыше 600 °С они полностью нивелируются (рисунок 10).

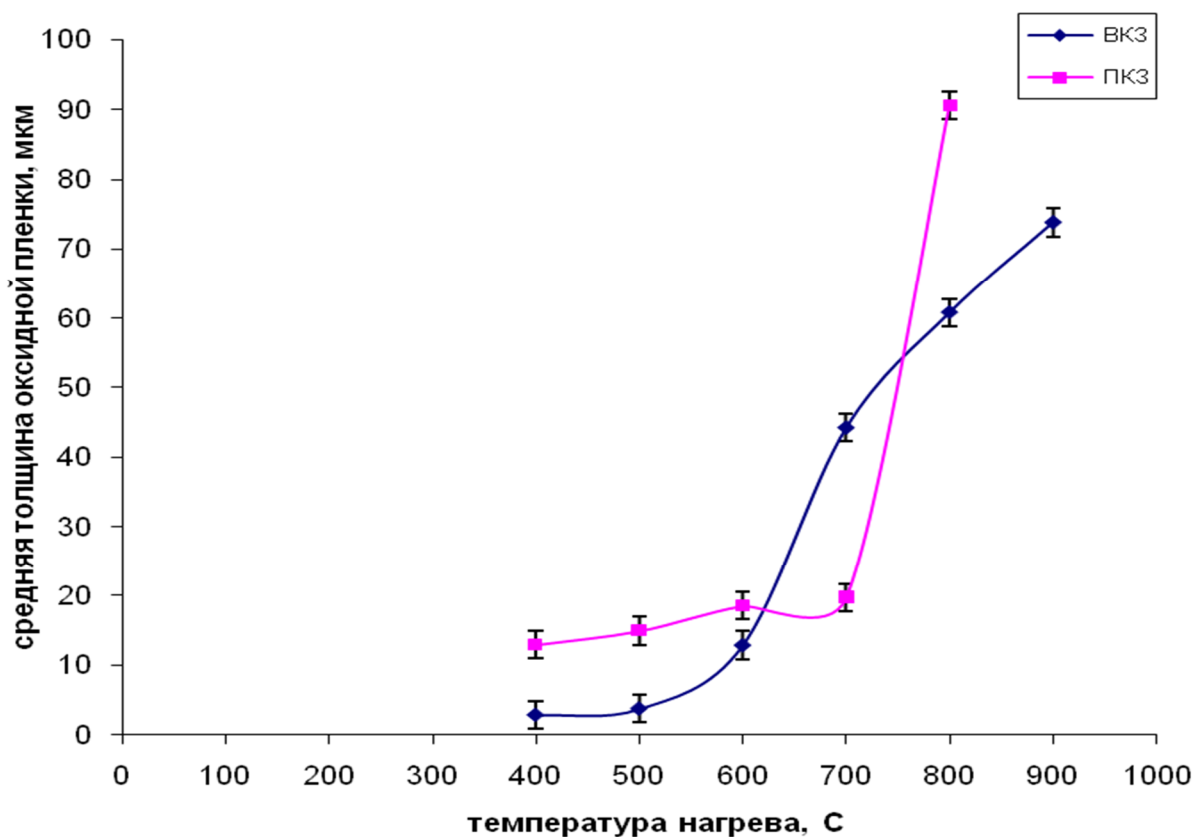


Рисунок 10 - Зависимость среднего значения толщины оксидной пленки при ПКЗ и ВКЗ в медном проводнике от температуры нагрева. Время нагрева 20 мин

Рентгенофазовый анализ оплавлений медных проводников, возникших в результате токовой перегрузки, показал, что данный метод непригоден для дифференциации условий формирования подобных оплавлений.

Показано, что существует два механизма формирования оплавлений, вызванных токовой перегрузкой, в зависимости от кратности сверхтока.

В четвертой главе «Дифференциация следов короткого замыкания и внешнего теплового воздействия в латунных токопроводящих изделиях» приведены дифференцирующие признаки короткого замыкания и внешнего теплового воздействия для проводников тока из латуни. Данные признаки выявляются при морфологическом анализе методом СЭМ. На поверхности латунных контактов после КЗ с деталями из меди, алюминия и стали, образуются микродефекты тонкой структуры оксидной пленки в виде шарообразных частиц микронных размеров, которые отсутствовали на исходном контакте (рисунок 11). Данные частицы также были обнаружены в зоне, прилегающей к месту оплавления, и

наблюдались на всех образцах, подвергшихся воздействию токов короткого замыкания, как в условиях «до пожара», так и в условиях «в ходе пожара».

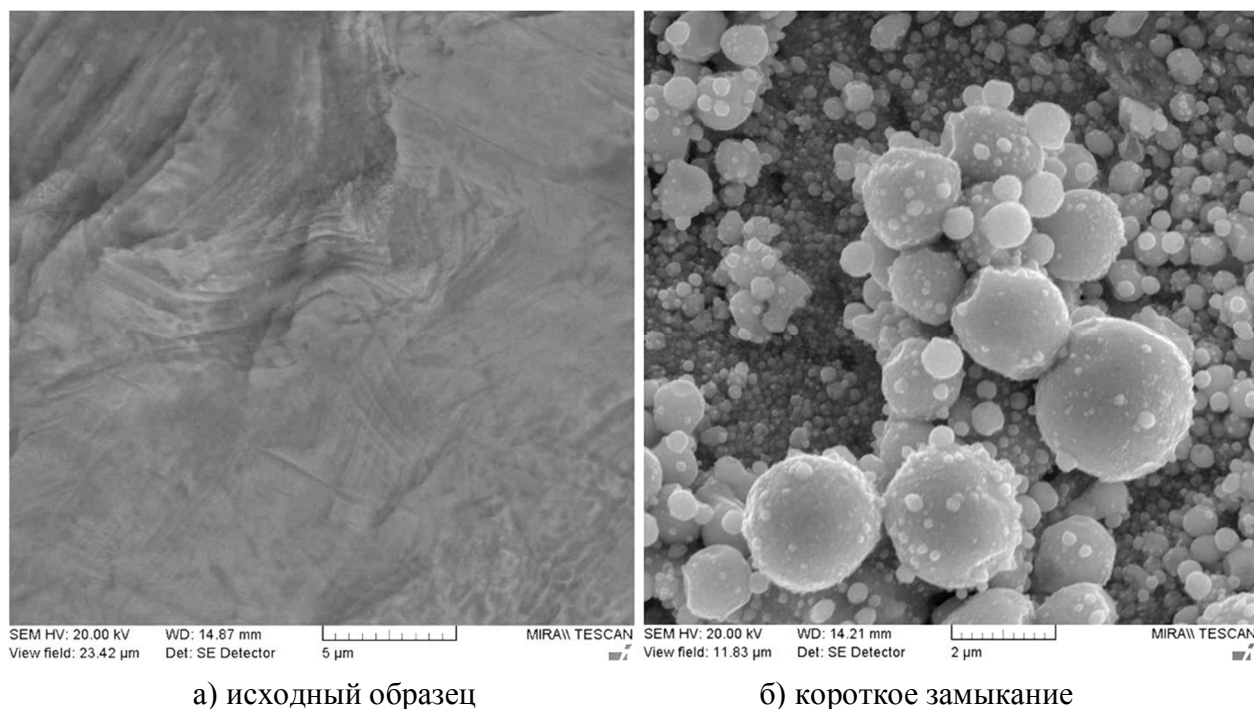


Рисунок 11 – Вид структуры поверхности латунного контакта (СЭМ, 2000^x)

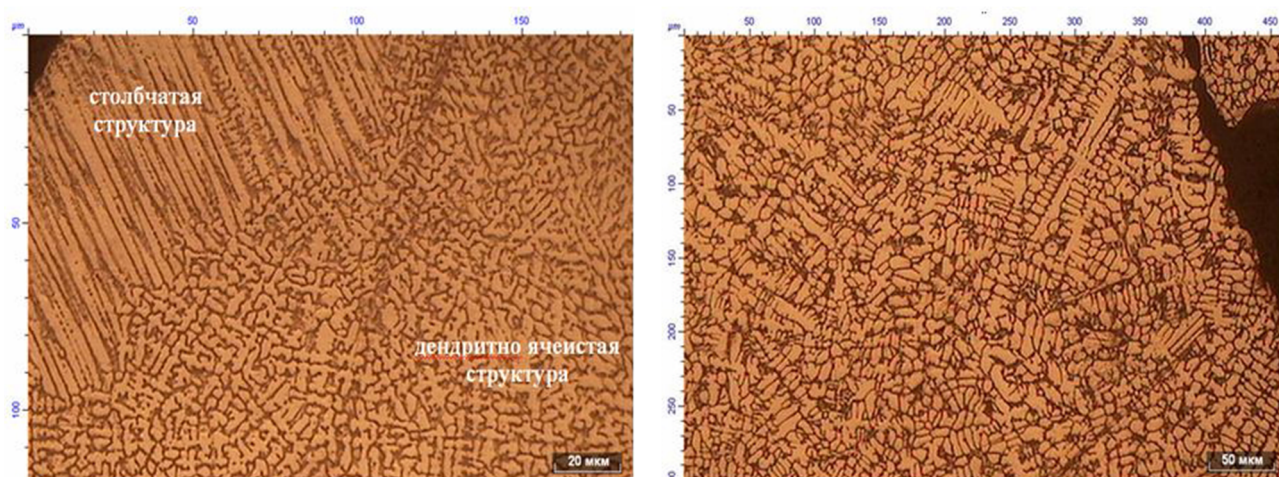
Поверхности образцов, нагретых в муфельной печи до температуры 1100 °С, также имели микродефекты, однако, последние были распределены хаотично, а их форма была неправильной и значительно отличалась от морфологии микрооплавлений, образующихся при КЗ.

Показано, что при коротком замыкании между парами металлов и сплавов: латунь-латунь, латунь-медь, латунь-сталь и латунь-алюминий, наблюдается процесс массопереноса химических элементов. При определении металла, с которым произошло взаимодействие латунного изделия, наиболее информативным является элементный анализ поверхности, прилегающей к месту оплавления. Вероятность диагностирования посторонних элементов во внутреннем объеме оплавления достаточно мала.

В ходе количественного анализа элементного состава оплавлений латунных деталей, вызванных токами КЗ, был обнаружен феномен уменьшения концентрации цинка на 1,5 – 2 % масс. в оплавленной части латунного контакта. При этом, изменения концентрации цинка в латунных контактах, оплавленных в муфельной печи при температуре до 1100 °С, не наблюдалось. Таким образом, было высказано предположение о снижении концентрации цинка в зоне, подвергшейся воздействию электродугового процесса КЗ. Дальнейший отжиг

латунной детали, вплоть до температуры плавления латуни, не влиял на содержание цинка – концентрация в зоне оплавления оставалась пониженной.

Металлографический анализ оплавлений латунных деталей, вызванных дугой КЗ, показал наличие структур быстрой кристаллизации – дендритов, ячеек, столбчатых зерен (рисунок 12). При этом, оказалось, что данные структуры формируются как в условиях первичного, так и в условиях вторичного КЗ.



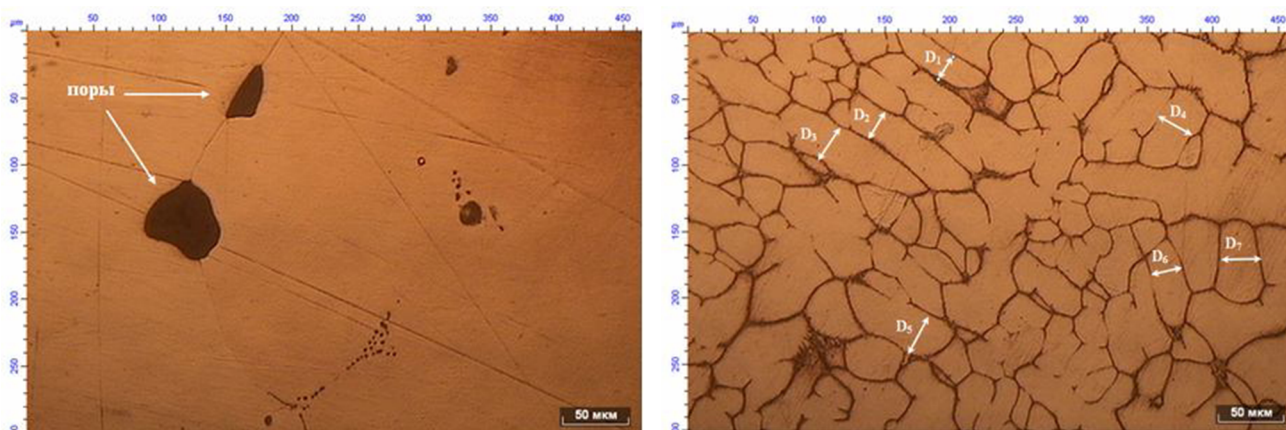
а) дендритно-ячеистая и столбчатая структуры

б) дендритно-ячеистая структура

Рисунок 12 - Различные виды микроструктур оплавлений изделий из α -латуни

Показано влияние отжига на микроструктуру быстрой кристаллизации - свыше 450 – 550 °С она исчезает и переходит в структуру отожженной α -латуни. Дифференцирующие признаки КЗ в виде структур быстрой кристаллизации, таким образом, нивелируются. Однако, диагностическим признаком оплавления латунной детали в результате КЗ при ее вторичном нагреве в ходе пожара свыше 450 - 550 °С можно считать различие хотя бы в один размер зерна между участком оплавления и участком основного металла.

В случае быстрого охлаждения оплавления водой (режим, моделирующий водяное тушение на пожаре) в α -латуни образовывались структуры, вид которых схож со структурами быстрой кристаллизации при КЗ - дендриты, ячейки и столбчатые зерна (рисунок 13).



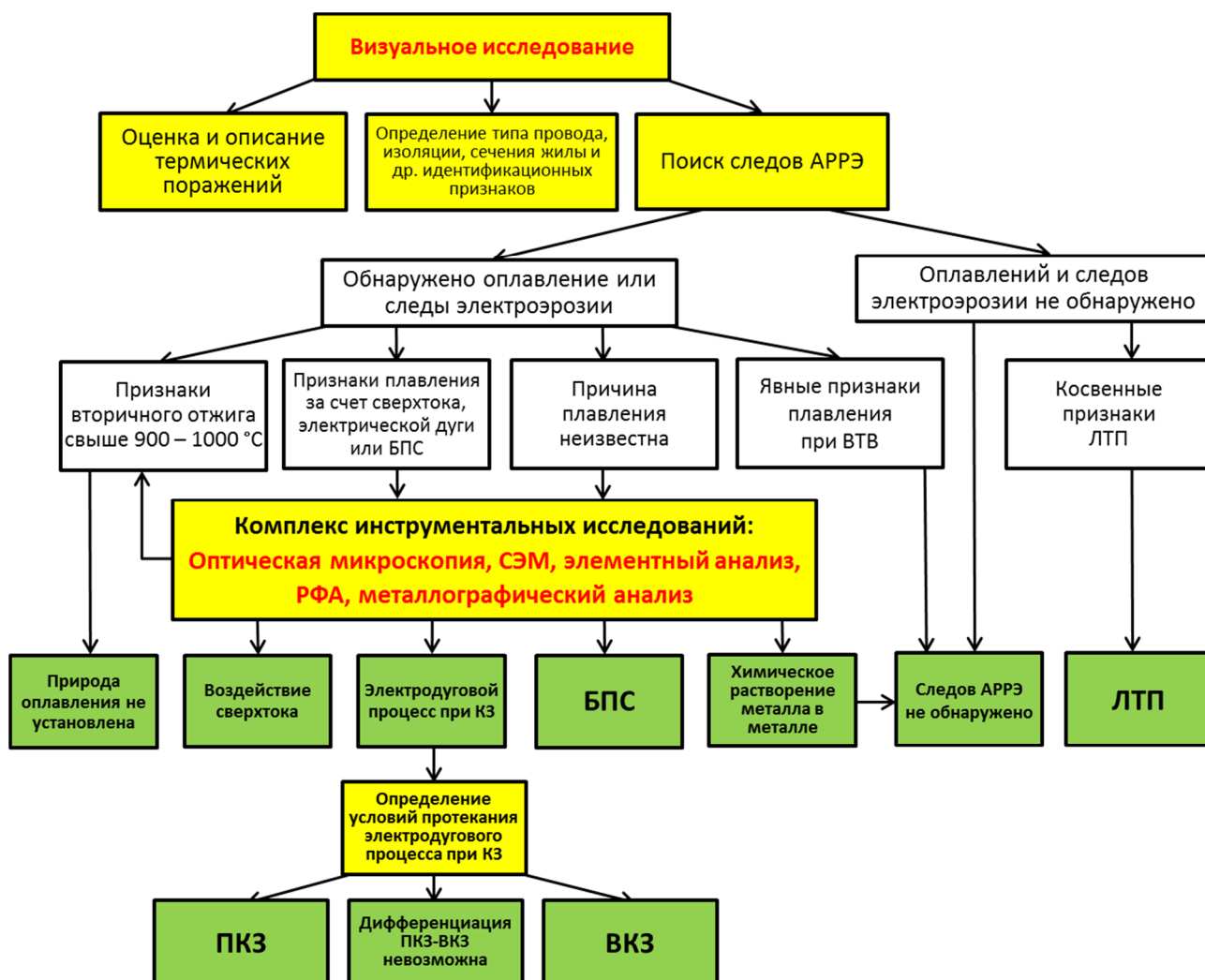
а) медленное охлаждение (в печи), равноосные зерна α -фазы

б) быстрое охлаждение (в воде), ячеисто-столбчатая структура α -фазы

Рисунок 13 - Микроструктуры оплавлений латунных контактов, образовавшихся в результате их нагрева выше температуры плавления $T=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Различные скорости охлаждения

Тем не менее, установлено, что существует диагностический параметр, позволяющий дифференцировать внешнее тепловое воздействие и КЗ. Им является усредненный поперечный размер D структурных составляющих. При тепловом воздействии пожара и быстром охлаждении, данный параметр D превосходит значение для КЗ в несколько раз и составляет величину порядка $10 - 30\text{ мкм}$, а при коротком замыкании $D = 4 - 10\text{ мкм}$.

В пятой главе «Исследование оплавлений медных проводников и латунных электротехнических изделий при экспертизе пожаров» предложены основы усовершенствованной методики экспертного исследования оплавлений медных проводников после пожара. Систематизированы признаки, характерные для оплавлений медных проводников различной природы, а также методы их обнаружения, дана схема экспертного исследования (рисунок 14).



Примечание:

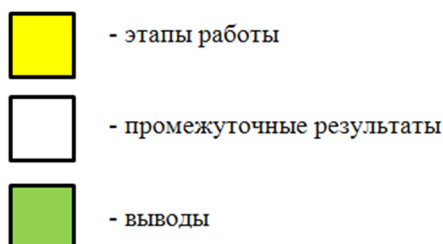


Рисунок 14 – Схема экспертного исследования после пожара медных проводников

Также в данной главе предложены методические основы экспертного анализа токоведущих металлоизделий из латуни. Дана схема экспертного исследования электротехнических изделий из латуни после пожара (рисунок 15).

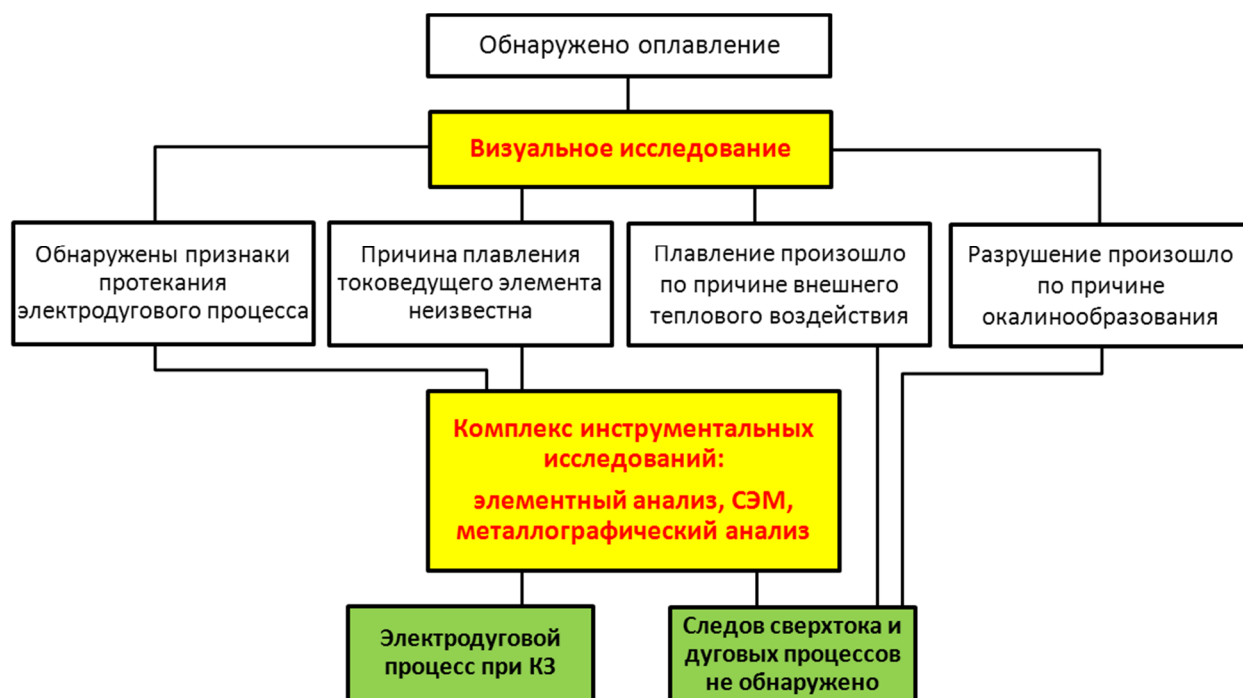


Рисунок 15 – Схема экспертного исследования оплавлений латунных изделий

Приведены примеры экспертного исследования, основываясь на полученных результатах, латунных элементов электросети, изъятых с мест реальных пожаров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения экспериментов по моделированию пожароопасных аварийных электрических режимов (короткого замыкания и перегрузки по току) с последующим исследованием визуальным и инструментальными методами оплавлений медных проводников и латунных токоведущих изделий, было установлено следующее:

1 Действие тока перегрузки может приводить к разделению медного проводника на части, а также к появлению на его поверхности характерных следов - вздутий, утолщений и шеек.

2 Вздутия на поверхности медного проводника образуются только при наличии на нем целой изоляции. Таким образом, их присутствие на проводнике, изъятom с места пожара, является криминалистически значимым признаком целостности изоляции провода в момент протекания аварийного режима.

3 При разделении медного проводника на части в результате токовой перегрузки на его концах в зонах разрыва могут образовываться оплавления различной формы. Морфология таких оплавлений сходна с последствиями воздействия на проводник дуги КЗ.

4 При перегрузке более 12 - 14 крат действие сверхтока приводит к разделению медного проводника на несколько частей, т.н. фрагментации.

5 Количественная оценка следов токовой перегрузки (вздутий, утолщений, шеек и фрагментации) на медном проводнике показала их зависимость от кратности тока перегрузки. Так, например, количество вздутий увеличивается при увеличении кратности сверхтока.

6 Протекание сверхтока в медном проводнике вызывает в нем образование специфических следов, которые могут быть выявлены методом металлографии. К числу таких следов относятся: поверхностное и межпроволочное оплавление, оплавление границ зерен, макropора в центральной части оплавления.

7 Содержание кислорода в оплавлениях, вызванных токами перегрузки варьируется – от 0,05 до 0,39 % и выше. С увеличением кратности перегрузки снижается содержание кислорода в оплавлении. Так, при 9-кратной перегрузке и более содержание кислорода в оплавлении медной жилы остается на исходном уровне 0,05 %. В пределах оплавления могут наблюдаться зоны с кардинально различающимся содержанием кислорода и формой зерна.

8 Определены диагностические критерии, позволяющие дифференцировать следы КЗ, возникающего при контакте латунных изделий с другими металлами и следы внешнего теплового воздействия.

9 Отжиг электродуговых оплавлений латуней при температуре выше 500 °С приводит к уничтожению структур быстрой кристаллизации. Однако, сравнение размеров зерен на оплавленном участке и в основном металле дает возможность установить причину разрушения латуни. При этом также сохраняется визуально наблюдаемая граница между оплавлением и основным металлом.

10 Внешнее тепловое воздействие пожара, нагрев свыше температуры плавления латуни и быстрое охлаждение водой формируют структуры быстрой кристаллизации, схожие со структурами, образующимися при КЗ. Установлен, однако, диагностический параметр, позволяющий отличить КЗ от внешнего теплового воздействия: им является усредненный поперечный размер структурных составляющих.

11 При контакте с алюминиевым проводником в микроструктуре однофазной α -латуни может дополнительно образовываться β -фаза, что затрудняет диагностику причины разрушения латунного изделия металлографическим методом.

12 Выявлены диагностические признаки, позволяющие определить причину разрушения при пожаре латунных контактов – дифференцировать электродуговой процесс и внешнее тепловое воздействие. На поверхности латунных контактов в зоне, прилегающей к месту оплавления, вызванного электрической дугой КЗ, при увеличениях более 2000^x,

обнаруживалось наличие множества шарообразных частиц микронных размеров (менее 10 мкм). Подобные следы не были обнаружены на поверхности латунных контактов, нагретых выше температуры плавления латуни в муфельной печи. Шарообразные частицы сохранялись при дополнительном отжиге до 700 °С. Дальнейший нагрев вызывал их уничтожение.

13 При электродуговом контакте латунных изделий с проводниками тока из меди, алюминия и стали наблюдался процесс массопереноса элементов с одного металла на другой, зафиксированный методами РФА и электронной микроскопией. Наиболее информативным способом определения металла, с которым произошло взаимодействие латунного изделия, является анализ поверхности, прилегающей к месту оплавления.

14 На металлографических полированных шлифах латунных контактов, подвергшихся электродуговому контакту с другими металлами, устойчиво воспроизводилось понижение содержания цинка в месте оплавления на 1,5 – 2 % масс, чего не наблюдалось в оплавлениях, образовавшихся при тепловом воздействии в муфельной печи.

15 Выявленные закономерности и диагностические признаки позволяют предложить для практического применения при экспертизе пожаров усовершенствованную аналитическую схему экспертного исследования оплавлений медных проводников и латунных контактных изделий.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в научных изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для опубликования основных результатов диссертационных исследований:

1. Мокряк, А.Ю. Дифференциация следов электродуговых процессов и внешнего теплового воздействия при экспертном исследовании после пожара латунных изделий. I Металлографический анализ. [Текст] / А.Ю. Мокряк, И.Д. Чешко // Пожарная безопасность. – 2011. – № 1. – С. 107 – 113. 0,4/0,2 п.л.

2. Мокряк, А.Ю. Дифференциация следов электродуговых процессов и внешнего теплового воздействия при экспертном исследовании после пожара латунных изделий. Морфологический и элементный анализ. [Текст] / А.Ю. Мокряк, И.Д. Чешко // Пожарная безопасность. – 2014. – № 1. – С. 46 – 52. 0,4/0,2 п.л.

3. Мокряк, А.Ю. Морфологический анализ медных проводников, подвергшихся воздействию токовой перегрузки, при экспертизе пожаров. [Текст] / А.Ю. Мокряк, И.Д. Чешко, В.В. Пеньков // Научно-аналитический журнал «Проблемы управления рисками в техносфере». – 2014. – № 4 (32). – С. 41 – 49. 0,4/0,2 п.л.

4. Мокряк, А.Ю. Металлографический анализ медных проводников, подвергшихся воздействию токовой перегрузки, при экспертизе пожаров. [Электронный ресурс] / А.Ю.

Мокряк, И.Д. Чешко // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2014. – № 4. – С. 51 – 58. 0,6/0,3 п.л.

5. Мокряк, А.Ю. Механизм формирования следов протекания сверхтоков по медному проводнику. [Электронный ресурс] / И.Д. Чешко, А.Ю. Мокряк, С.В. Скодтаев // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2015. – № 1. – С. 41 – 46. 0,6/0,2 п.л.

Публикации в других изданиях:

6. Мокряк, А.Ю. Экспертное исследование латунных изделий после пожара. Сканирующая электронная микроскопия и элементный анализ. [Текст] / А.Ю. Мокряк, И.Д. Чешко // Расследование пожаров. – 2010. – № 3. – С. 41 – 45. 0,6/0,3 п.л.

7. Мокряк, А.Ю. Актуальность проблемы экспертного анализа оплавлений медных проводников после пожара. [Электронный ресурс] / А.Ю. Мокряк, С.О. Шульгин, Н.Н. Романов // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). – 2013. – № 2. – С. 41–46. 0,4/0,2 п.л.

8. Мокряк, А.Ю. Экспертный анализ оплавлений медных проводников, образовавшихся при токовой перегрузке. [Текст]: сборник научных статей по матер. IV Междунар. науч. конф. (20 марта, 2014 г., г. НовиСад) // Пожарная безопасность. - Сербия: Техническая школа прикладных исследований. – 2014. – С. 82 – 92. 0,6/0,3 п.л.

9. Мокряк, А.Ю. Влияние отжига на микроструктуру оплавлений медных проводников, вызванных сверхтоком. [Текст]: сборник научных статей по матер. V Междунар. науч.-практ. конф. (17 апреля, 2014 г., г. Воронеж) // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. - Воронеж: ФГБОУ ВПО Воронежский институт ГПС МЧС России. – 2014. – С. 241 – 245. 0,25/0,15 п.л.

10. Мокряк, А.Ю. Выявление признаков токовой перегрузки на медных проводниках. [Текст]: сборник научных статей по матер. V Междунар. науч.-практ. конф. (19 января, 2015 г., г. Москва) // Теория и практика судебной экспертизы в современных условиях. – М.: МГЮА им. О.Е. Кутафина. - 2015. – С. 125 – 128. 0,25/0,15 п.л.

11. Мокряк, А.Ю. Применение сканирующей электронной микроскопии для определения природы оплавлений медных проводников при пожаре. [Электронный ресурс] / И.Д. Чешко, А.Ю. Парийская, А.Ю. Мокряк // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. – № 2. – 2015. – С. 5 – 11. 0,4/0,2 п.л.

12. Мокряк, А.Ю. Рентгенофазовый анализ медных проводников, подвергшихся воздействию сверхтоков. [Электронный ресурс] / А.Ю. Парийская, И.Д. Чешко, А.Ю. Мокряк // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. – № 2. – 2016. – С. 14 – 20. 0,4/0,2 п.л.

13. Мокряк, А.Ю. Усовершенствование методики экспертного исследования после пожара оплавлений медных проводников. [Текст]: сборник научных статей по матер. V Междунар. науч.-практ. конф. (19 января, 2017 г., г. Москва) // Теория и практика судебной экспертизы в современных условиях. – М.: МГЮА им. О.Е. Кутафина. – 2017. – С. 238 – 241. 0,2/0,1 п.л.

Подписано в печать 06.03.2018. Формат 60×84 ¹/₁₆
Печать офсетная. Усл.-печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 157

Академия ГПС МЧС России. 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4