МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ

АКАДЕМИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ СЛУЖБЫ

На правах рукописи

1

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)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

> Научный руководитель: д.т.н., профессор, засл. деятель науки РФ Чешко И.Д.

оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ПОЖАРООПАСНЫЕ АВАРИЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ, ИХ	
ПОСЛЕДСТВИЯ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРТНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	
(АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР)	. 11
1.1 Виды аварийных режимов работы электросети и их	. 11
пожарная опасность	. 11
1.1.1 Короткое замыкание и токи утечки	. 12
1.1.2 Токовая перегрузка	. 14
1.1.3 Большие переходные сопротивления	. 15
1.2 Инструментальные исследования оплавлений металлических проводников	
тока при определении их природы	. 16
1.3 Особенности микроструктуры медных сплавов	. 21
1.3.1 Медь и ее микроструктура	. 21
1.3.2 Виды латуней и их микроструктура	. 22
1.3.3 Микроструктура металла после электродугового воздействия	. 26
2 МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОСЕТИ	
И УСЛОВИЙ ПОЖАРА. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЛАВЛЕНИЙ	. 29
2.1 Экспериментальный электротехнический стенд	. 29
2.1.1 Устройство стенда	. 29
2.1.2 Электрическая схема стенда	. 33
2.2 Выбор объектов исследования	. 36
2.3 Моделирование аварийных режимов	. 37
2.3.1 Короткое замыкание на медных проводниках	. 37
2.3.2 Короткое замыкание на латунных контактах	. 38
2.3.3 Токовая перегрузка на медных проводниках	. 38
2.3.4 Внешнее тепловое воздействие	. 39
2.4 Методы исследования оплавлений	. 40
2.4.1 Морфологическое исследование визуальным методом	. 40

2.4.2 Морфологическое исследование методом сканирующей электронной	
микроскопии	. 41
2.4.3 Рентгенофазовый анализ медных проводников	. 41
2.4.4 Металлографический анализ медных и латунных проводников тока	. 42
2.4.5 Рентгенофлюоресцентный анализ латунных проводников тока	. 43
3 АНАЛИЗ ОПЛАВЛЕНИЙ МЕДНЫХ ПРОВОДНИКОВ, ПОДВЕРГШИХСЯ	
ВОЗДЕЙСТВИЮ СВЕРХТОКА	. 44
3.1 Признаки термического проявления сверхтока на медном проводнике	. 44
3.2 Влияние величины тока КЗ на микроструктуру медного проводника	. 50
3.4 Вздутия и механизм их образования	. 57
3.5 Влияние отжига на микроструктуру оплавлений медных проводников	. 66
3.6 Анализ оплавлений различной природы методом сканирующей	
электронной микроскопией	. 74
3.7 Особенности, возникающие при анализе оплавлений медных проводников	
методом рентгенофазового анализа	. 79
3.8 Механизм формирования следов протекания по медному проводнику	
сверхтока	. 85
4 ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ СЛЕДОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ И	
ВНЕШНЕГО ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ЛАТУННЫХ	
ТОКОПРОВОДЯЩИХ ИЗДЕЛИЯХ	. 93
4.1 Признаки КЗ и внешнего теплового воздействия при морфологическом	
анализе методом СЭМ	. 93
4.2 Элементный анализ массопереноса при КЗ латунных контактов	. 95
4.3 Определение концентрации цинка после КЗ латунных контактов	. 99
4.4 Признаки КЗ и внешнего теплового воздействия при металлографическом	
анализе	101
5 ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЛАВЛЕНИЙ МЕДНЫХ ПРОВОДНИКОВ И	
ЛАТУННЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ЭКСПЕРТИЗЕ	
ПОЖАРОВ	111
5.1 Схема экспертного исследования оплавлений медных проводников	111

5.2 Схема экспертного исследования электротехнических изделий из латуни	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	127
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	130
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акты внедрения	140

введение

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. В промышленно развитых странах, в том числе и в России, доля пожаров от электротехнической продукции ежегодно составляет от 15 до 25 % [19]. 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 [64, 65].

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 [8, 13, 21, 24, 26, 27, 29, 68, 69]. 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. Хегемайером в шестидесятых годах прошлого века [92]. Во Всесоюзном научноисследовательском 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 установления первая отечественная инструментальная методика момента возникновения КЗ на И алюминиевых медных проводах, позволяющая дифференцировать дуговые оплавления, возникшие в результате так называемых «первичных» и «вторичных» КЗ [62]. Свое развитие методика получила в работах

5

Всесоюзного научно-исследовательского института МВД СССР (ВНИИ МВД СССР) и экспертно-криминалистического центра МВД России (ЭКЦ МВД России) [13, 21, 24, 26, 27, 29]. Экспертному исследованию медных проводников после пожара также посвящены работы, в том числе при их контакте с проводниками тока, выполненными из других металлов [1, 24, 51, 56, 61]. В комплексе с указанными методиками следует рассматривать методику экспертного исследования следов БПС, которые возникают в электроцепях в зонах т.н. «плохих контактов» [77 - 79] 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, нередки 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 [8, 13, 21, 24, 26, 27, 29] не всегда проявляются и зачастую конфликтуют друг с другом. Применяемая на практике методика [24] не учитывает ряд существенных факторов, оказывающих влияние на конечный вид микроструктуры оплавления медного проводника, в частности, способ прокладки электропроводки (в кабельканалах, гофрированных пластиковых и металлических трубках), который затрудняет приток кислорода к месту КЗ; кратность тока перегрузки; длительность дугового процесса и др.

Кроме того, объектами исследования [24] 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 [65]. 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 одном 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 в электротехнике 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 [30].

7

Степень научной разработанности

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. [24, 29, 56, 65], а также ряда зарубежных исследователей - Hagemuer W., Babrauskas V., Ettling B., Beland B [80 - 110].

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 не проводились.

Цели и задачи исследования

Целью работы является разработка методических основ экспертного исследования после пожара оплавлений медных проводников токами перегрузки, латунных токоведущих изделий и расширение, таким образом, аналитических возможностей комплекса инструментальных методов установления 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 характерных для пожара условиях;

- проведен анализ различными инструментальными методами образцов, полученных в ходе проведения экспериментов, и систематизированы признаки, указывающие на природу и условия формирования оплавлений токоведущих металлоизделий из меди и латуни;

- предложены аналитические схемы экспертного исследования после пожара оплавлений медных проводников и латунных токоведущих изделий;

- полученные результаты апробированы при экспертных исследованиях по реальным пожарам.

Научная новизна работы

Выявлены и классифицированы признаки, характеризующие протекание сверхтока по медному проводнику. Проведена количественная оценка таких следов в зависимости от кратности сверхтока.

Обнаружена зависимость содержания кислорода в оплавлении от кратности сверхтока.

Усовершенствована аналитическая схема экспертного анализа после пожара оплавлений медных проводников.

Разработана аналитическая схема экспертного анализа после пожара оплавлений латунных токоведущих изделий.

Выявлены диагностические критерии, позволяющие определить причину разрушения при пожаре латунных контактов (электродуговой процесс или 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 при экспертном исследовании объектов, изъятых с места пожара.

Практическая значимость работы заключается в использовании ее результатов непосредственно в экспертной практике, а также при последующей разработке

9

экспертных методик, связанных с установлением причин пожаров с использованием инструментальных методов исследования объектов электротехнического назначения.

Область, методология и методы исследования

Область исследования соответствует специальности 05.26.03 - Пожарная и промышленная безопасность (технические науки, отрасль энергетика) п.5 «Разработка научных основ, моделей и методов исследования процессов горения...» и их последствий.

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

Для решения поставленных задач применялся визуальный морфологический анализ и инструментальные методы исследования - сканирующая электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ, рентгенофлюоресцентный анализ, металлографический анализ.

Положения, выносимые на защиту

1) Результаты исследования визуальными и инструментальными методами оплавлений медных проводников и латунных токоведущих изделий, полученные в ходе моделирования пожароопасных аварийных режимов работы электросети.

2) Объяснения механизма формирования оплавлений, влияния сопутствующих процессу факторов на их геометрическую форму, структуру и свойства.

3) Аналитические схемы экспертного исследования оплавлений медных проводников и латунных контактных изделий, изъятых с места пожара.

Степень достоверности и апробация результатов

Приведенные в диссертационной работе результаты получены с применением комплекса современных аналитических методов, взаимно дополняющих друг друга, соответствуют научным представлениям об электродуговых процессах и процессах, протекающих при нагреве металлов и сплавов. Результаты проведенной работы успешно апробированы на реальных пожарах.

1 ПОЖАРООПАСНЫЕ АВАРИЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ, ИХ ПОСЛЕДСТВИЯ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРТНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ (АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР)

1.1 Виды аварийных режимов работы электросети и их

пожарная опасность

Электрооборудование может инициировать возникновение пожара в результате возникновения того или иного аварийного электрического режима. Известно, что пожарную опасность может представлять любая электрическая цепь, в которой локально, в течение определенного времени рассеивается мощность более 12-15 Вт [65].

Причинами возгорания электропроводки могут являться:

- нагрев проводников;

- искрение в месте плохого электрического контакта;

- утечка тока по загрязнениям с неизолированных участков цепи;

- горение электрической дуги, вызванное током КЗ [63, 66].

При решении вопроса о технической причине пожара в судебной пожарнотехнической экспертизе обычно анализируется причастность к его возникновению следующих основных аварийных режимов:

- короткого замыкания;

- перегрузки по току или напряжению;

- большого переходного сопротивления (БПС).

Источниками зажигания, проявляющимися при аварийных электрических режимах, являются:

а) Значительное тепловыделение при прохождении сверхтока. Если тепловыделение при прохождении сверхтока превышает теплоотвод в окружающую среду, провод или иной элемент электрической цепи нагревается, что ведет к термической деструкции изоляции или иных примыкающих к зоне нагрева органических материалов и, в конечном счете, может привести к их загоранию.

б) Искры и микродуги, возникающие при БПС;

в) Макродуги, возникающие при КЗ;

г) Раскаленные частицы и капли расплавленного металла, образующиеся при КЗ [65].

1.1.1 Короткое замыкание и токи утечки

Коротким замыканием (КЗ) принято называть не предусмотренное нормальными условиями работы замыкание токоведущих частей, имеющих различную полярность, подключенных к различным фазам или имеющих различные потенциалы [10].

Существует несколько классификаций коротких замыканий: по количеству замкнувших фаз (в сетях с изолированной и заземленной нейтралями), по месту возникновению КЗ в электроустановках, по значению тока замыкания, по значению переходного сопротивления в точке замыкания (полное КЗ или металлическое; неполное КЗ или неметаллическое).

С точки зрения пожарной опасности, из всех параметров, характеризующих КЗ, наиболее важны именно сопротивление в зоне замыкания, длительность КЗ и кратность тока КЗ. Параметры эти взаимосвязаны – величина сопротивления определяет значение тока КЗ и его длительность и, в конечном счете, сам механизм зажигания изоляции проводников [60, 64, 65].

Короткие замыкания В электрической цепи возникают вследствие механического повреждения изоляции, либо ee старения, длительного воздействия влаги или высоких температур. Также причиной повреждения изоляции могут послужить ошибочные действия обслуживающего электросети персонала. В момент короткого замыкания резко увеличивается сила тока и, как следствие, растет количество выделяемой тепловой энергии, количество которой пропорционально квадрату силы тока. При воздействии на изоляцию высокой температуры происходит резкое снижение ее диэлектрических свойств. При КЗ образуются электрическая дуга, в результате которой происходит выброс мелких частиц расплавленного металла, которые, в свою очередь, также способны зажечь окружающие горючие вещества или материалы. Температура разлетающихся

частиц металла может достигать 2700 °С, а скорость полета – до 11 м/с [14, 17, 65, 73, 74].

Одной из основных первопричин возникновения аварийного режима КЗ являются *токи утечки*. Вследствие воздействия на изоляцию проводов и кабелей каких-либо агрессивных сред или влаги появляются поверхностные токи утечки, и, как результат, ухудшаются диэлектрические свойства изоляции. Если процесс повторяется в течение длительного времени, то это приводит, в конечном счете, к неугасающим токам утечки, искрению. Постепенно изоляция начинает обугливаться и со временем теряет электрическую прочность, т.е. ухудшаются ее диэлектрические свойства. Такая ситуация опасна возникновением дуговых разрядов, приводящих к короткому замыканию токоведущих жил, способных при определенных условиях воспламенить изоляцию [75].

Следствием электрической дуги КЗ является образование т.н. дуговых оплавлений, которые, как правило, сохраняются после пожара и становятся объектом экспертного исследования. Электрическая дуга и ее признаки – дуговые оплавления – могут возникать как до пожара (т.н. «первичные» КЗ), так и в ходе пожара, в результате обугливания и (или) полного выгорания электрической изоляции (т.н. «вторичные» КЗ).

При КЗ в электрической сети устанавливается определенный ток, величина которого зависит от следующих факторов [65]:

- мощности источника тока (чем больше мощность, тем больше ток КЗ);

- удаленности источника питания от места КЗ, т.е. величина полного сопротивления элементов цепи, включенных между источником тока и точкой КЗ;

- вида КЗ (при однофазном КЗ ток будет меньше, чем при трехфазном);

- времени между возникновением КЗ и отключением тока аппаратами защиты.

При трехфазном КЗ токи могут составлять: на зажимах электродвигателей – до 2 кА; на шинах распределительных шкафов – 3,5-10 кА; на шинах главных силовых щитов – 10 - 20 кА [65].

Таким образом, при возникновении КЗ, пока не сработала защита, по всему проводу (кабелю) идет ток КЗ, многократно превышающий номинальный. Это может привести к загоранию изоляции проводов и других горючих материалов, находящихся в контакте с раскаленным проводником тока.

1.1.2 Токовая перегрузка

Токовая перегрузка - это аварийный пожароопасный режим, при котором по элементу электросети проходит ток, превышающий номинальное значение, на которое рассчитан данный элемент (проводник, кабель, устройство электрозащиты) [10, 12].

В результате токовой перегрузки элемент электросети перегревается, и в нем происходят различного рода изменения. Тепловые эффекты, сопровождающие этот режим, и соответствующие повреждения элементов электроустановок, различаются в зависимости от кратности тока перегрузки, которая равна величины рабочего отношению тока К номинальному ИЛИ длительно допустимому. Например, при перегрузках с кратностью не более двух в элементах электросети за короткое время не возникают заметные термические повреждения. Однако при длительной работе в этих же условиях происходит перегрев проводников или токопроводящих деталей, постепенное разрушение их изоляции со значительным снижением ее изоляционных свойств. Так, при температуре нагрева проводников выше 65 °C изоляция проводов высыхает и с течением некоторого времени теряет свою эластичность, в ней появляются трещины, приводящие к заметному снижению сопротивления изолирующего покрова жил и появлению токов утечки. При более высоких перегрузках за сравнительно короткое время могут произойти размягчение и деформация изоляционных покровов, а также размягчение, деформация или плавление металла жил проводов и токоведущих деталей. Как правило, после разрушения изоляции возникает короткое замыкание с характерными для него пожароопасными факторами.

Наряду с этим, при перегрузке изолированного электропровода реализуется специфический способ нагревания изоляции и особый источник зажигания.

14

Нагрев изоляции происходит одновременно по всей поверхности, которая контактирует с токопроводящей жилой, и сопровождается интенсивным образованием горючей смеси продуктов пиролиза с воздухом. Этот процесс при условии включенного источника электропитания может продолжаться до полного разрушения проводника, которое произойдет, например, при достижении токоведущей жилой температуры плавления металла.

Разрушение электропроводника может произойти и по другому механизму. Например, при температуре, близкой к температуре плавления металла проводника, свободно висящего на элементах конструкций, он может разрушиться под действием собственного веса. Характерно, что при достижении этого момента произойдет разрыв жилы, сопровождающийся искровым разрядом. Этот разряд является эффективным источником зажигания образовавшейся горючей смеси.

При еще больших кратностях токов перегрузки источниками зажигания могут явиться нагретые до высокой температуры токопроводящие жилы и другие детали. Следует также учитывать, что процесс прогрева и пиролиза изоляции происходит на всем протяжении токоведущей жилы, и поэтому возгорание может произойти на одном или даже нескольких наиболее теплонапряженных участках линии.

1.1.3 Большие переходные сопротивления

Большим переходным сопротивлением (БПС или «плохой контакт») называют аварийный пожароопасный режим, возникающий при переходе электрического тока с одного проводника на другой. Выделение тепла в контактных переходах электрических цепей является одной из причин возникновения аварийных режимов в электрооборудовании и технологических установках.

Пожарная опасность электрического соединения в режиме «плохого контакта» способна проявиться при номинальных значениях электрического тока или даже при значениях тока меньше номинального. В режиме «плохого контакта» переходное сопротивление и падение на нем напряжения в десятки и сотни раз

15

превышают нормативные значения. Вероятными источниками зажигания при этом являются нагретые проводники, электрическая дуга, раскаленные или горящие частицы. В режиме БПС создаются поля повышенных температур и концентраций продуктов пиролиза полимерных материалов [79].

1.2 Инструментальные исследования оплавлений металлических проводников тока при определении их природы

Методики анализа оплавлений медных проводников относятся к одним из первых инструментальных методик, разработанных и нашедших широкое применение в пожарно-технической экспертизе.

Первые работы по данной проблематике были выполнены А. Шонтагом, В. Хагемайером, Б. Эттлингом [89, 90, 92]. Авторы указывали на возможность дифференциации оплавлений медных проводников различной природы методом металлографии. Они установили, что различия в структуре оплавлений возникают за счет преимущественного образования в зависимости от состава окружающей среды одного из медных окислов – оксида меди (I) и – оксида меди (II). Отмечалось также, что перегрев провода токами КЗ или перегрузки создают в металле жилы большое количество газовых пустот.

Первая отечественная методика исследования оплавлений медных и алюминиевых проводников была разработана специалистами ВНИИПО под руководством профессора Г.И. Смелкова. Впервые были определены количественные критерии дифференциации ПКЗ-ВКЗ, а в качестве метода исследования было предложено использовать рентгеноструктурный анализ [21].

В дальнейшем данная методика развивалась с применением более совершенной экспертной техники и методов анализа сотрудниками ВНИИ (ЭКЦ) МВД СССР (РФ) [24, 26, 27, 29]. Комплексная методика исследования медных и алюминиевых проводников, разработанная ЭКЦ, включала в себя 4 этапа – визуальный осмотр, морфологический анализ с помощью растрового (РЭМ), электронного микроскопа рентгеноструктурный анализ, металлографическое исследование. В настоящее время на практике, в сочетании с

визуальным осмотром, применяются два последних инструментальных метода. Исследование с помощью РЭМ применяется достаточно редко ввиду малой доступности соответствующего оборудования.

В принципе, оплавления и иные разрушения проводника на пожаре совсем не обязательно являются следствием КЗ. Они могут быть, кроме того, следствием:

- механического воздействия на проводник (среза, обрыва и т.д.);

- растворения металла в металле при попадании менее тугоплавкого металла на более тугоплавкий (например, расплавленного алюминия на медь, латунь, сталь);

- расплавления проводника под действием «тепла пожара»;

- расплавление проводника за счет тепловыделения при прохождении токов перегрузки [24].

После предварительного изучения и отбора проводников непосредственно на пожаре, требуются их дополнительные исследования для уточнения причины разрушения, а уж затем, если оплавление действительно дуговое, решение вопроса о первичности или вторичности КЗ [24].

1) Визуальное исследование

Исследование проводится невооруженным глазом и с помощью оптического микроскопа.

При оплавлении в результате внешнего теплового воздействия (тепла пожара) для проводника характерны изменения сечения по длине проводника и протяженная зона оплавления. Оплавление имеет произвольную форму. Термические поражения провода нарастают по мере приближения к оплавлению. Если изоляция сохранилась, то для нее характерно обугливание и оплавление с наружной поверхности.

При механическом разрушении проводника (например, обрыве провода упавшими конструкциями) обычно имеется характерный признак, отсутствующий при КЗ – наличие на конце проводника так называемой «шейки» - локального утончения материала проводника в месте разрушения [24].

Оплавления и проплавления, возникающие при растворении металла в металле, часто по внешнему виду воспринимаются как следы электрической дуги. Но это может быть следствие попадания на более тугоплавкий металл расплавленного менее тугоплавкого, например, расплавленного алюминия на медь, латунь, сталь и т.д.

Конец медного проводника, разрушенного в результате попадания расплавленного алюминия, обычно имеет вид косого среза или кратера. Как правило, на торце просматриваются вкрапления алюминия и поэтому он имеет серебряную окраску [24]. На других участках провода признаков, позволяющих дифференцировать данный механизм, не наблюдается.

При КЗ оплавления носят локальный характер (дуга плавит металл направленно, в локальной зоне) и имеют округлую форму, вид косого среза или кратера. Сечение проводника может изменяться вблизи оплавления на небольшом участке. Изоляция, в случае ее сохранения, обуглена изнутри.

При КЗ на конце проводника (в зоне оплавления) и вблизи него отсутствуют включения инородного металла, что характерно для расплавления при попадании инородного более легкоплавкого металла, например, алюминия [24].

2) Металлографическое исследование

Для исследования микроструктуры металла в месте оплавления приготавливают микрошлиф. Изучение микроструктуры производят на металлографическом микроскопе, в белом и поляризованном свете, обычно при увеличении 50-200^x [24].

Медь в исходном состоянии может иметь волокнистую нерекристаллизованную структуру или мелкозернистую с двойниками [11, 15, 16, 18]. Вдоль провода, по направлению к оплавлению, в различных ситуациях (КЗ, перегрузка, внешнее тепло пожара) могут наблюдаться участки частичной, полной, собирательной рекристаллизации, плавления [24].

В случае ПКЗ в месте оплавления наблюдается двухфазная структура - эвтектический сплав Cu + (Cu - Cu₂O). При этом в зависимости от длительности

дугового процесса могут наблюдаться следующие 3 характерные микроструктуры:

1. В сплаве содержится от 0,05% до 0,39% кислорода (определяется при помощи эталонов микроструктуры или расчетным путем) [11, 38].

2. В сплаве содержится 0,39% кислорода. В этом случае структура состоит сплошь из эвтектики Cu - Cu₂O.

3. В расплавленной меди растворилось более 0,39% кислорода. В этом случае помимо эвтектики в структуре появляются первичные кристаллы оксида меди (I) Cu₂O.

В условиях, характерных для ПКЗ, происходит быстрое охлаждение расплавленной электрической дугой части проводника – пожара еще нет и сам проводник, за исключением места КЗ, а также окружающая атмосфера холодные и хорошо отводят тепло. Это приводит к тому, что образующиеся в расплаве центры кристаллизации начинают интенсивно расти В направлении максимального отвода тепла (по металлу проводника). В результате образуется зона вытянутых кристаллов, получивших название столбчатых дендритов. Такая структура является устойчивым физическим признаком, характеризующим ПКЗ. Этот признак сохраняется при последующем высокотемпературном (до 1000 °C) отжиге в ходе развившегося пожара.

Отсутствие в атмосфере при ПКЗ газов-восстановителей (оксида углерода, водорода и др.) приводит к тому, что газовые поры и раковины в зоне оплавления не образуются [24].

В случае ВКЗ наблюдается иная микроструктура. Присутствие в атмосфере пожара оксида углерода приводит к исчезновению эвтектики Cu - Cu₂O по границам зерен меди, а присутствие в атмосфере небольших количеств водорода, помимо этого, способствует образованию газовых пор и раковин по границам и внутри тела зерен меди. Сами зерна литой меди имеют равноосную округлую форму.

В тех случаях, когда содержание кислорода в атмосфере понижено, но концентрация газов-восстановителей недостаточна для восстановления меди, по

границам зерен может наблюдаться тонкая прослойка эвтектики Cu - Cu₂O. Но массовая доля кислорода при этом не превышает 0,05 %.

3) Рентгеноструктурный анализ

Как отмечалось выше, отечественная методика рентгеноструктурного анализа медных проводников с дуговыми оплавлениями, позволяющая дифференцировать ПКЗ и ВКЗ, впервые была разработана во ВНИИПО профессором Смелковым Г.И. с соавторами. В методике использовалась рентгеновская съемка проводников фотометодом [63].

В существенно модернизированном виде, с использованием рентгеновских дифрактометров общего назначения, методика была разработана в 1986 году в ЭКЦ МВД СССР Россинской Е.Р. с соавторами [29].

С помощью данной методики исследуются провода и кабели без металлической оплетки, с медными жилами, проложенные как открыто, так и в металлорукавах, трубах.

В отличие от первых методик, в которых дифференциация ПКЗ/ВКЗ строилась на определении соотношения в дуговом оплавлении оксидов меди (I) и (II), указанная рентгеновская методика базируется на сравнении концентраций в поверхностном слое проводника одного оксида Cu₂O, но на разном удалении от места оплавления.

Методики выявления признаков ПКЗ-ВКЗ на медных проводах являются одними из наиболее востребованных и широко используемых инструментальных методик СПТЭ. И, в то же время, достаточно часто критикуемых как учеными, так и специалистами- практиками. Последние отмечают случаи, когда оплавления с признаками КЗ вдруг оказываются вне зоны очага или таких оплавлений оказывается не одно, а несколько, или выводы о первичности КЗ никак не стыкуются с прочими известными и установленными фактами по пожару.

Методик экспертного анализа после пожара электротехнических изделий, выполненных из латуни (например, контактов, контактных пластин и т.д.), 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. На практике зачастую экспертный анализ электротехнических изделий из латуни, изъятых с места пожара, проводится по методике анализа оплавлений медных проводников. Это приводит к ошибочным экспертным выводам о природе оплавлений латунных изделий, поскольку, как будет показано далее, микроструктура латуней, ее видоизменения при нагреве, плавлении и кристаллизации отличаются от меди.

1.3 Особенности микроструктуры медных сплавов 1.3.1 Медь и ее микроструктура

Наиболее распространенным материалом, из которого изготавливают электропроводку и другие кабельные изделия, является медь. Медь – это пластичный металл, который плавится при температуре 1083 °C. Отличительная особенность меди - ее малое электросопротивление, высокая теплопроводность.

Примеси оказывают существенное влияние на механические, технологические и физические свойства меди. Так, примеси в виде серы и кислорода образуют тугоплавкие эвтектики, которые располагаются по границам зерен, что приводит к появлению хрупкости меди. Микроструктура литой меди 1.1). полиэдрическая, зернистая (рисунок Микроструктура холоднодеформированной меди, подвергнутой последующему рекристаллизационному отжигу, такая же, но с наличием двойников (рисунок 1.1) [25, 28].

21



a)



Рисунок 1.1 - Микроструктура меди (справа - схематическое изображение): а) литой; б) холоднодеформированной, подвергнутой рекристаллизационному отжигу

1.3.2 Виды латуней и их микроструктура

Латуни представляют собой двойные и многокомпонентные медные сплавы, в которых основным компонентами являются медь и цинк. Содержание цинка в латунях, изделия из которых используют в быту, промышленности, электротехнике и т.д., не превышает 45 % [67].

Двойные, или простые, латуни относятся к системе Cu-Zn. Как следует из диаграммы состояния, представленной на рисунке 1.2, у сплавов меди с цинком при комнатной температуре возможно образование пяти фаз:

- α-твердый раствор цинка в меди. Растворимость цинка в меди при комнатной температуре равна 39 %, она не изменяется практически до 454 °C и убывает до 32 % при 902 °C;

- β-твердый раствор на базе электронного соединения CuZn;

- у и є - твердые растворы на базе различных электронных соединений;

- η-твердый раствор меди в цинке [31, 32].



Рисунок 1.2 - Диаграмма состояния системы Cu-Zn [25]

В силу более высоких литейных свойств, высокой пластичности и твердости латуни со структурами α и (α + β) получили наибольшее распространение в промышленности.

α-Латуни содержат меди не менее 61 % и, соответственно, цинка не более 39 %. Примером могут служить такие марки латуней как Л62, Л68, Л96 и др., представляющие собой класс т.н. деформируемых латуней. Из них изготавливают тонкие листы, ленты и другие полуфабрикаты, из которых в дальнейшем штампуют различные детали (таблица 1.1).

(α + β)–Латуни содержат 55-61 % меди. Наиболее распространенный представитель латуни с такой структурой является марка Л59. Из латуней этой марки изготавливают прутки, а из них с помощью обработки резанием – различные детали (таблица 1).

Марки	Фазовый	Применение
латуни	состав	
Л96	α	Радиаторные, конденсаторные и капиллярные трубки
Л90	α	Изготовление знаков отличия, фурнитуры, художественных изделий
Л85	α	Детали машин, приборов теплотехнической и химической аппаратуры, змеевики, сильфоны, гибкие шланги, контакты, пружины, конденсаторные трубы, детали холодильного оборудования и др.
Л80	α	Проволочные сетки в целлюлозно-бумажной промышленности, сильфоны и др.
Л68	α	Радиаторные трубки автомобилей, штампованные изделия, трубопроводы, прокладки, шайбы, заклепки, сетки
Л63	α	Гайки, болты, детали автомобилей, конденсаторные трубы, трубопроводы, прокладки, шайбы, заклепки, сетки
Л60	$\alpha + \beta$	Толстостенные патрубки, гайки, детали машин, трубопроводы, прокладки, шайбы, заклепки, сетки
Л59	$\alpha + \beta$	Листы, прутки, трубы

Таблица 1.1 – Марки простых латуней и их применение [25]

Как было отмечено выше, латуни, применяемые для изготовления электротехнических изделий, могут иметь два вида микроструктуры: однофазная, т.н. (α-латунь и двухфазная, т.н. (α+β)-латунь.

Микроструктура литой однофазной латуни имеет дендритное строение (рисунок 1.3). Эта же латунь после холодной обработки давлением и рекристаллизационного отжига, имеет структуру полиэдрических зерен с расположенными внутри двойниками (рисунок 1.3).

Микроструктура литой двухфазной (α+β)-латуни состоит из светлых зерен αфазы и темных зерен β–фазы (рисунок 1.4). В деформированной и отожженной (α+β)–латуни внутри зерен α-фазы также имеются двойники (рисунок 1.4) [47, 48].



Рисунок 1.3 - Микроструктуры α-латуней, 100^x



а) в литом состоянии



б) после деформации и отжига

Рисунок 1.4 - Микроструктуры ($\alpha + \beta$)-латуней, 100^x

На рисунке 1.4 видно, что микроструктура двухфазной латуни после деформации и отжига представляет собой дендритоподобные зерна. При экспертном анализе эта структурная особенность может быть принята за быстрое охлаждение при электродуговом процессе. Очевидно, однако, что в данном случае не только не было дугового процесса, но и не была достигнута температура плавления латуни.

Следует обратить внимание на то, что добавление других элементов к латуни, имеющей однофазную структуру, может вызывать смещение областей на диаграмме состояния и, соответственно, способствовать образованию двухфазной латуни. Такое воздействие, например, оказывает алюминий или компоненты припоя – свинец и олово.

Указанные особенности необходимо учитывать при разработке основ экспертной методики анализа электротехнических изделий из латуни после пожара.

1.3.3 Микроструктура металла после электродугового воздействия

В результате протекания электродугового процесса короткого замыкания в оплавленном участке металла шва могут образоваться, в зависимости от условий кристаллизации, различные структуры, которые условно можно разделить на два вида:

– ячеистая структура, состоящая из ряда параллельных элементов, имеющих форму стержней и расположенных в направлении кристаллизации (рисунок 1.5);

– дендритная структура.

Дендритная структура может иметь несколько разновидностей:

 – столбчатые дендриты, т.е. дендриты у которых хорошо развились только оси 2-го порядка;

- дендритно-ячеистая структура - смешанная структура;

- равноосные дендриты.

Подобные структуры возникают в результате высокой скорости кристаллизации расплавленного металла и могут наблюдаться как отдельно, так и совместно друг с другом [46]. Наличие той или иной структуры зависит от степени переохлаждение расплава – в зонах с высокой скоростью охлаждения образуется дендритная структура, по мере уменьшения скорости структура становится ячеистой.



в) 200^х

г) 100^x

Рисунок 1.5 – Примеры различных видов структур после быстрой кристаллизации расплавленного металла: а) ячеистая структура; б) дендриты; в) столбчатые дендриты; г) смесь дендритной структуры кристаллитов со столбчатой ячеистой структурой

С увеличением скорости кристаллизации существенно утончаются элементы субструктуры и, кроме того, возникает переход от ячеистого строения к структуре столбчатых дендритов.

Основные выводы по главе 1

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.

2 МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОСЕТИ И УСЛОВИЙ ПОЖАРА. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЛАВЛЕНИЙ

2.1 Экспериментальный электротехнический стенд

Для моделирования пожароопасных аварийных режимов работы электросети и условий пожара был разработан и введен в эксплуатацию экспериментальный электротехнический стенд (ЭЭС, далее стенд). Ниже приведено устройство стенда и его электрическая схема.

2.1.1 Устройство стенда

ЭЭС представляет собой комплексную установку, разработанную на базе климатической камеры типа КТВ Э-0,4-002 (рисунок 2.1). Принципиальная схема стенда представлена на рисунке 2.2. Основными его конструктивными элементами являются [5, 45]:

- *рабочий объем,* предназначенный для закрепления образца и моделирования электрических аварийных режимов в условиях пожара, и в условиях его отсутствия;
- -*контрольно-измерительная аппаратура,* предназначенная для контроля температуры, газового состава атмосферы и токов КЗ;
- *панель управления* приспособление, на которое выведены основные элементы управления функциями электротехнического стенда;
- *вспомогательные блоки,* представляющие собой приточно-вытяжную вентиляцию, систему охлаждения газов;
- *-силовая часть*, состоящая из трансформатора, балластного резистора и панели коммутации.

Внутренний рабочий объем камеры, называемый большим рабочим объемом (БРО), может быть герметично изолирован от внешней среды, что позволяет наполнять его продуктами горения полимерных материалов (резина, пластмасса, древесина и т.п.) тем самым, создавая необходимую газовую атмосферу. На рисунке 2.3 показано внутреннее устройство БРО.



Рисунок 2.1 – Внешний вид электротехнического стенда



Рисунок 2.2 - Принципиальная схема электротехнического стенда

ПВВ – приточно-вытяжная вентиляция;

- Э электроды с зажимными контактами;
- МРО малый рабочий объём;

БРО – большой рабочий объём;

ПУ – панель управления;

КИП – контрольно-измерительные приборы;

СОГ – система охлаждения газов;

Образец – медный проводник, а также иные детали электрооборудования.



Рисунок 2.3 – Устройство большого рабочего объема (БРО) ПВВ – приточно-вытяжная вентиляция; Э – электроды с зажимными контактами; МРО – малый рабочий объём; СОГ – система охлаждения газов;

В большом рабочем объеме камеры установлена металлическая станина, в верхней части которой закреплена радиационная панель (РП), предназначенная для регулируемого нагрева (20 ÷ 800 °C) образца. Регулировка температуры осуществляется как в автоматическом режиме, с использованием терморегулятора ТП 403 «Варта», так и в ручном режиме, методом изменения величины напряжения, поданного на нагревательный элемент. В ручном режиме контроль температуры нагревательного элемента выполняется посредством измерения величины термопарой и выводом ее значения на контрольно-измерительные приборы (рисунок 2.4).

Также на станину при помощи диэлектрического крепежа установлены электроды (Э) с зажимными контактами, между которыми закрепляется экспериментальный образец.



- 1. Индикация работы постоянного тока;
- Индикация работы переменного тока через трансформатор;
- Индикация работы переменного тока от сети 220 В;
- 4. Индикация работы первого токового диапазона;
- Индикация работы второго токового диапазона;
- 6. Переключатель РП;
- Переключатель муфельной печи;
- Переключатель вентилятора БРО;
- Переключатель вентилятора муфельной печи;
- Переключатель диапазонов тока 0÷100 А и 100÷1000 А;
- Кнопка включения контактора трансформатора;
- Регулировка тока токового диапазона 0÷100 А (грубо, плавно, точно);
- Индикация задаваемого тока, А;
- Регулировка тока токового диапазона 100÷1000 А (грубо, плавно, точно);
- 15. Индикация открытой заслонки БРО
- 16. Переключатель открытия (закрытия) заслонки БРО
- 17. Индикация включения муфельной печи
- Переключатель муфельной печи
- 19. Индикация показаний термопары №1
- 20. Управление РП
- 21. Переключатель РП
- 22. Индикация показаний термопары №2
- 23. Индикация тока РП
- 24. Регулировка тока РП

Рисунок 2.4 – Панель контрольно-измерительных приборов и их функциональное назначение

С целью улучшения контроля температуры и газового состава атмосферы внутри БРО на металлической станине был сконструирован т.н. малый рабочий объем (МРО). МРО выполнен в виде металлического короба, внутренняя поверхность которого оклеена огнестойкой минеральной ватой, поверх которой нанесена алюминиевая оболочка.

Короб закреплен на станине при помощи штатива, позволяющий перемещать МРО в вертикальном направлении, регулируя тем самым расстояние между образцом и РП. В малом рабочем объеме, в зоне крепления экспериментального образца, подведена термопара, используемая для контроля и регистрации температуры на объекте. Также при помощи термопары осуществляется контроль температуры на РП. Значения температур выводится на панель управления.

Необходимая газовая атмосфера создается за счет нагрева радиационной панелью образцов, расположенных во время эксперимента на дне МРО.

Регистрация газового состава атмосферы (O₂, CO, CO₂, N₂) осуществляется посредством газоанализатора «Оптогаз-500». Газ, поступающий в газоанализатор, проходит предварительное охлаждение, необходимое для нормальной работы прибора. Система охлаждения газов представляет собой емкость, заполняемую водой, внутри которой в виде спирали расположена трубка, по которой проходит газ из рабочего объема камеры. Удаление газов из БРО после окончания эксперимента осуществляется при помощи приточно-вытяжной вентиляции.

2.1.2 Электрическая схема стенда

Электрическая схема стенда состоит из трех основных частей:

-регулятор мощности силового трансформатора;

-силовая часть;

-автоматика, схемы выключения, панели управления.

Регулятор мощности

Регулятор предназначен регулировки мощности однофазного для трансформатора мощностью 40 кВт, при токе нагрузки менее 500 А. Работа схемы управления разделяется на два этапа (см. принципиальную схему, изображенную на рисунке 2.5). На первом этапе, на контакте «1» потенциал выше, чем на контакте «3». Диод D3 открыт, D4 - работает как стабилитрон с напряжением 10 В, конденсатор С2 заряжен. При пробое конденсатор С2 разряжается со скоростью определяемой резистором R2.2, резистор R4 - ограничитель. После разряда C2 открывается транзисторы T3 и T4, подается управляющее напряжение на тиристор D2, который закроется при смене потенциалов «1» и «3». На втором этапе работает другое «плечо» схемы аналогично предыдущему описанию. Резисторы R5, R6, R7, R8, R9, R10 предназначены для ограничения управления и его деформирования. Дифференцирующая цепочка необходима для работы регулятора на индуктивную нагрузку (C3, R11).

Техническое описание силовой части

Принципиальная схема силовой установки ЭЭС приведена на рисунке 2.6. Питание силовой части осуществляется от главного распределительного щита (ГРЩ), где после включения рубильника фидера напряжение поступает на трехполюсный автоматический выключатель серии ВА 57-39 (номинальный ток 630 A). От автоматического выключателя запитан контактор серии КТ 6053-У3 (номинальный ток 630 A). Контактор включается пусковой кнопкой на панели управления, при этом положение «включено» дублируется световой индикацией кнопки. С контактора питание подается на регулятор нагрузки (PH) и систему регуляции трансформатора (мощность трансформатора составляет 40 кВт, ток нагрузки - менее 500 A).

В зависимости от положения переключателя диапазонов (I диапазон – 0 ÷100 А; II диапазон - 100 ÷ 1000 А) включается магнитный пускатель (ПМ), который подает напряжение на РН' трансформатора 2. Напряжение на трансформатор 1 подается перемычкой с панели коммутации. В зависимости от выбранных видов и

диапазонов тока, устанавливается нужная комбинация перемычек на панели коммутации.

Напряжение на выпрямитель подается и снимается с панели коммутации. Балластный резистор (БР) подключается к электродам электроустановки с помощью панели коммутации и перемычки на корпусе БР.

Таким образом, электрическая часть ЭЭС позволяет задавать токи нагрузки в диапазоне от 0 до 1000 А, грубо и плавно регулируя их.



Рисунок 2.5 – Принципиальная схема регулятора мощности больших токов



Рисунок 2.6 – Принципиальная схема силовой части ЭЭС

2.2 Выбор объектов исследования

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). Выбор латуни марки Л63 был обусловлен тем, что она наиболее часто используется для изготовления различных контактов, деталей электроустановочных и коммутационных изделий.

2.3 Моделирование аварийных режимов

2.3.1 Короткое замыкание на медных проводниках

Чаще всего пожароопасный аварийный режим начинается с «неметаллического» КЗ, появлению токов утечки через поврежденную по той или иной причине изоляцию. Именно такой режим наиболее пожароопасен, т.к. рост тока при нем ограничен, и электрическая защита не срабатывает или срабатывает с опозданием.

Моделирование «неметаллического» КЗ проводилось следующим образом. Провод сначала подвергали воздействию перегрузки ограниченной кратности (до 1,5 – 2 крат). Это приводило к нагреву изоляции и ее искусственному старению и образованию в ней дефектов. И затем уже такой "состаренный" провод подвергали перегрузке большей кратности (4 - 20), что, как правило, приводило к пробою "состаренной" изоляции и возникновению КЗ. На рисунке 2.7 показана схема проведения эксперимента.

Первичное КЗ моделировали указанным способом при следующих постоянных условиях: напряжение переменного тока – 220 В; температура окружающей среды – 20 °C; нормальная атмосфера.

Моделирование т.н. вторичного КЗ, (в условиях «пожара») проводилось при локальном нагреве провода радиационной панелью до температуры 300 - 400 °С в атмосфере газообразных продуктов неполного сгорания древесины, резины и тканей.



Рисунок 2.7 – Схема моделирования аварийного режима КЗ

2.3.2 Короткое замыкание на латунных контактах

КЗ между латунными контактами осуществлялось путем их прямого замыкания. Условия моделирования следующие: напряжение переменного тока – 220 В; температура окружающей среды – 20 °С; нормальная атмосфера.

Такое же полное «металлическое» КЗ осуществлялось между латунными металлоизделиями и проводниками тока из других металлов.

Моделирование вторичного короткого замыкания (ВКЗ) проводили при тех же электрических параметрах в присутствии газообразных продуктов термической деструкции древесных полимерных материалов. Газовый состав атмосферы (O₂ и CO) контролировался газоанализатором «Оптогаз-500». Одновременно с этим контактные пары образцов нагревали радиационной панелью до температур 250 – 350 °C.

2.3.3 Токовая перегрузка на медных проводниках

Эксперименты по моделированию токовой перегрузки на медных проводниках проводили на электротехническом стенде при следующих условиях:

напряжение переменного тока – 220 В; температура окружающей среды – 20 °С; – нормальная атмосфера. Закрепленный к электрическим контактам образец проводника длиной 40 – 100 см в изоляции поддерживался снизу подложкой из асбеста. При этих условиях через проводник пропускали токи перегрузки различной кратности – от 2 до 20 крат с шагом в 1 крат. Так, например, для медного проводника площадью сечения 2,5 мм² предельно допустимым значением тока является тока порядка 30 А [53, 58]. Соответственно, в ходе эксперимента проводник данного сечения подвергали токам перегрузки от 60 до 600 А. При каждом значении кратности перегрузки эксперимент повторяли трижды. В ходе эксперимента секундомером фиксировалось время от момента подачи тока на образец до разрушения (разрыва) проводника. Данные эксперименты проводились с проводниками в изоляции и без изоляции. На рисунке 2.8 показана схема проведения эксперимента.



Рисунок 2.8 – Схема моделирования аварийного режима токовой перегрузки

2.3.4 Внешнее тепловое воздействие

Воздействие внешнего тепла пожара - само по себе и как фактор дополнительного воздействия на сформировавшиеся оплавления (отжиг проводов и оплавлений) моделировали следующим образом: образцы медных проводников помещали в муфельную печь, в которой происходило расплавление меди при температуре 1200 °C. Атмосфера продуктов сгорания в печи создавалась сжиганием полимерных материалов. Медный проводник выдерживался

расплавленном состоянии в течение 5 минут. Охлаждение полученного оплавления осуществлялось медленно в печи.

Отжиг оплавлений медных проводников, полученных в результате моделирования аварийных процессов, проводился в муфельной печи при следующих условиях:

- температура нагрева: 500 – 900 °С (с шагом 100 °С);

- скорость нагрева: 10° град/мин;

- время выдержки образцов: 20 мин;

-охлаждение до комнатной температуры проводилось в муфельной печи при открытой дверце.

Моделирование внешнего теплового воздействия на электротехнические изделия из латуни осуществлялось их нагревом в муфельной печи при температурах 300, 400, ..., 1100 °C и временах выдержки - 20, 40, 60 мин, скорость охлаждения – медленная (в печи), средняя (на воздухе), быстрая (в воде).

2.4 Методы исследования оплавлений

2.4.1 Морфологическое исследование визуальным методом

Осмотр и визуальное исследование полученных образцов оплавлений проводились невооруженным глазом, а также с применением увеличивающей лупы или оптического микроскопа при увеличениях до 40 – 50^x. На этой стадии также осуществлялась фотосъемка оплавлений проводников тока.

Количественную оценку следов, образовавшихся в результате протекания по медным проводникам сверхтока, проводили с использованием оптического микроскопа «МЕТАМ ЛВ-31» при увеличениях от 5 до 15 крат и компьютерной программы для анализа изображения «Image Expert Pro Nexsys» [49, 50].

2.4.2 Морфологическое исследование методом сканирующей электронной

микроскопии

Морфологическому анализу подвергали оплавления медных проводников и латунных металлоизделий.

Исследование структуры поверхности, а также измерение толщины имеющейся на ней оксидной пленки проводилось на сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA\\XMU с вольфрамовым катодом и высоким вакуумом в камере. Для изучения топографии поверхности использовался SE - детектор вторичных электронов [55].

Исследование проводилось при следующих условиях:

- режим высокого вакуума: $\ge 1 \cdot 10^{-2} \Pi a;$

- ускоряющее напряжение: 20 кВ-30 кВ;

- ток зонда: 2 пА – 40 нА;

- рабочее расстояние: 10-30 мм;

- увеличение: 600 ÷ 2000 ^х.

Измерение толщины оксидной пленки проводилось на её сколе при увеличениях от 900^х. Участок скола ориентировали перпендикулярно пучку электронов. Для определения среднего значения толщины проводилось не менее 10 измерений на каждом из оплавлений.

2.4.3 Рентгенофазовый анализ медных проводников

При проведении рентгеноструктурного анализа применялся настольный минидифрактометр ДР-01 «Радиан». Материал анода – медный. Пределы допускаемой абсолютной погрешности определения положения дифракционного пика ± 0,08 град.

Для проведения исследования образец медного проводника длиной около 50 мм отделялся вместе с оплавлением. Образец протирался ватным тампоном, смоченным в этиловом спирте, для удаления оксида меди (II) CuO с поверхности провода. Объект исследования закреплялся в держателе рентгеновского дифрактометра таким образом, чтобы рентгеновский пучок попадал на участок съемки. Размер рентгеновского пучка вдоль оси проводника не превышал 2 – 3 мм, а поперек оси незначительно выступать за края проводника.

Анализу подвергали два участка проводника (рисунок 2.9):

- участок, расположенный рядом с оплавлением (участок A);

- участок, отстоящий от места оплавления на расстоянии не менее 35 мм (участок В).



Рисунок 2.9 – Участки медного проводника, на которых производится съемка дифрактограмм

Съемка на обоих участках осуществлялась при одинаковых условиях, приведенных ниже:

- интервал углов: 34 ÷ 46;
- напряжение на трубке: 30 кВ;
- ток на трубке: 4,8 мА;
- шаг детектора: 0,05°;
- время экспозиция: 3 сек;
- режим съемки непрерывный, с вращением.

2.4.4 Металлографический анализ медных и латунных проводников тока

Для проведения исследования специальным образом подготавливали микрошлифы оплавлений медных жил и латунных контактов. От жил и контактов отрезали участок, длиной 5 - 10 мм вместе с оплавлением и запрессовывали в форму. Запрессовку образцов в фенольную смолу «Phenocure (Bakelit)» осуществляли с помощью пресса Simplimet 1000 (фирма «Buehler»). Режимы работы пресса: давление 270 bar, температура 150 °C, время

нагрева 1 мин 50 сек. Полученные образцы шлифовали и полировали на металлографическом станке «Phoenix Beta» (фирма «Buehler).

Для выявления границ зёрен меди и латуни применяли химическое травление в 40 % солянокислом растворе хлорного железа.

Изучение микрошлифов проводили на металлографическом микроскопе МЕТАМ ЛВ -31 с использованием компьютерной программы для анализа изображения «Thixomet Pro» при увеличениях 50, 100, 200, 500, 1000^x. Определение количества кислорода в меди проводили с использованием эталонов микроструктур [11, 38].

2.4.5 Рентгенофлюоресцентный анализ латунных проводников тока

Определение элементного состава оплавлений латунных контактов осуществлялось методом рентгенофлюоресцентного анализа. Для этих целей использовалось следующее оборудование:

- сканирующий электронный микроскоп MIRA\XMU Tescan с полевой эмиссией, снабженный системой микроанализа INCA Energy 450 с безазотным энергодисперсионным спектрометром X–MAX 80 Oxford Instruments с площадью кристалла детектора 80 мм²;

- спектрометр универсальный СУР-02 «РЕНОМ-ФВ», снабженный SDD-детектором с охлаждением Пельтье площадью 10 мм². Разрешение по линии 5,9 кэВ не хуже 140 эВ. Максимальная скорость счета до 1 000 000 имп/сек. Источник рентгеновского излучения - рентгеновская трубка с максимальным напряжением 50 кВ и током 2 мА и анодом из родия. Обработка спектров осуществлялась с помощью компьютерной программы «SmartXrf», позволяющей проводить качественный и количественный анализы химических элементов от F(9) до U(92), содержащихся в пробе.

Количественный элементный анализ для повышения точности результатов [3] проводили на металлографических шлифах [4, 7, 22, 23].

Основные выводы по главе 2

Приведено устройство и электрическая схема экспериментального электротехнического стенда. Выбраны объекты и методы исследования. Описаны условия, при которых проводились экспериментальные исследования.

3 АНАЛИЗ ОПЛАВЛЕНИЙ МЕДНЫХ ПРОВОДНИКОВ, ПОДВЕРГШИХСЯ ВОЗДЕЙСТВИЮ СВЕРХТОКА

3.1 Признаки термического проявления сверхтока на медном проводнике

Протекание по проводам сверхтоков, вызванных токовой перегрузкой, приводило к перегреву проводников практически по всей трассе прохождения сверхтоков. Возникающие при этом термические поражения жил по внешнему виду схожи с последствиями внешнего теплового воздействия (протяженные зоны оплавления, изменения сечения и формы проводника). В конечном счете, при определенной кратности и длигельности воздействия процесс токовой перегрузки приводил к разрыву проводника. Разрыв происходил в локальной зоне или нескольких точках, при этом, на концах разорванного провода образовывались оплавления, которые имели самые разнообразные формы: парообразную, конусообразную, вид косого среза, вид поперечного среза, кратерообразную (рисунок 3.1). Необходимо отметить, что морфология таких оплавлений сходна с последствиями воздействия на проводник электрической дуги короткого замыкания



а) Шарообразное оплавление, 7^х



б) Оплавление в виде «косого

среза», 8^x



в) Оплавление в виде «поперечного среза», 7^x

Рисунок 3.1 – Локальные оплавления медного проводника различной формы, образовавшиеся в результате воздействия сверхтока

При определенных значениях крапности тока перегрузки на проводниках возникали специфические дефекты: *вздутия, утолщения и утончения (шейки), поверхностные оплавления.* Внешний вид этих следов показан рисунке 3.2. Ниже приведено их словесное описание:

вздутие – локальное округлое образование на поверхности проводника, как правило, полое внутри, образующееся в результате вытеснения расплавленного металла проводника над его поверхностью, вследствие протекания сверхтока (рисунок 3.2 а, б, в);

утолщение — увеличение поперечного размера проводника вследствие плавления металла, образующееся в результате протекания сверхтока (рисунок 3.2 г, д);

утончение (шейка) — локальное уменьшение поперечного размера проводника вследствие плавления металла, образующееся в результате протекания сверхтока (рисунок 3.2 e);

поверхностное оплавление – протяженное оплавление поверхностного слоя проводника при сохранении его формы и диаметра (рисунок 3.2 ж).



Рисунок 3.2 – Следы, образующиеся на поверхности медных проводников в результате токовой перегрузки кратностью свыше 3÷4

Также было отмечено, что при 18-кратной и более перегрузке проводник разделяется на несколько (более 2-х) отдельных фрагментов (рисунок 3.3). Этот процесс назван *фрагментацией*.

Процесс разделения проводника на части не всегда происходил до конца, при этом в «слабых» местах образовывалась либо оплавленная зона (рисунок 3.3 а), либо трещина без признаков оплавления (рисунок 3.3 б). Металлографические исследования участков, на которых сформировались трещины, показали, что разрушение проводника идет по границам зерен. В случае, если проводник разделился на отдельные части, то жила, как правило, была оплавлена с обоих концов (рисунок 3.3 в).



а) Незавершенная фрагментация. Оплавленные участки, 8^х



б) Незавершенная фрагментация. Трещина в однопроволочном проводнике, 9^х



в) Фрагментированные и оплавленные с двух концов фрагменты жил, 2^х

Рисунок 3.3 – Фрагментация медных проводников в результате протекания токовой перегрузки кратностью свыше 3 ÷ 4

В таблице 3.1 систематизированы полученные в ходе проведения экспериментов данные о наличии (отсутствии) выброса раскаленных частиц меди

при разрыве проводника на части; времени от момента возникновения в проводнике сверхтока до появления дыма, начала карбонизации изоляции и до разделения проводника на части; указаны специфические следы, образовавшиеся на медном проводнике при различных кратностях перегрузки.

Таблица 3.1 - Экспериментальные данные, полученные в ходе моделирования токовой перегрузки различной кратности на медном однопроволочном проводнике сечением 2,5 мм² в ПВХ-изоляции

Кратность	Выброс		Время [*] , с			Признаки на проводнике		
перегрузки,	металла	Появление	Карбонизация	Разделение	Фрагмен	Вздутия	Утолще	Утончени
ед.		дыма	изоляции	проводника	-тация		ния	я (шейки)
2	нет	60	нет	нет	нет	нет	нет	нет
3	нет	40	120	нет	нет	нет	нет	нет
4	нет	20	40	нет	нет	нет	нет	нет
5	нет	15	28	60	ед.	ед.	нет	нет
6	нет	10	19	28	ед.	ед.	нет	ед.
7	нет	8	14	19	ед.	ед.	ед.	ед.
8	нет	8	11	13	ед.	ед.	ед.	ед.
9	есть	5	8	10	ед.	множ.	ед.	ед.
10	есть	4	6	8	ед.	множ.	ед.	ед.
11	есть	3	6	8	ед.	множ.	ед.	ед.
12	есть	2	5	6	ед.	множ.	ед.	нет
13	есть	2	< 4	< 4	ед.	множ.	ед.	нет
14	есть	< 1,5	< 2	< 2	ед.	множ.	нет	нет
15	есть	< 1	< 2	< 2	ед.	множ.	нет	нет
16	есть	< 1	< 2	< 2	ед.	множ.	ед.	нет
17	есть	< 1	< 2	< 2	ед.	множ.	нет	нет
18	есть	< 1	< 2	< 2	ед.	множ.	нет	нет
19	есть	< 1	< 1	< 1	множ.	множ.	нет	нет
20	есть	< 1	< 1	< 1	множ.	множ.	нет	нет

Комментарии к таблице 3.1:

* – время, начиная с момента возникновения в проводнике сверхтока;

** – указано количество точек, в которых произошло разделение проводника;

«нет» – отсутствие признака или процесса;

«есть» – наличие процесса;

«ед.» – единичное количество;

«множ.» – множество.

На рисунке 3.4 показаны графики зависимости от кратности тока перегрузки от количества тех или иных характерных следов протекания сверхтока.



Рисунок 3.4 – Зависимость характерных следов на поверхности медного проводника от кратности токовой перегрузки



Продолжение рисунка 3.4 – Зависимость характерных следов на поверхности медного проводника от кратности токовой перегрузки

На рисунке 3.5 показана динамика изменения времени проявления различных процессов (дымообразования, визуальных признаков карбонизации изоляции и разделения проводника на части) в зависимости от кратности тока перегрузки.





Начиная с 3÷4-кратной перегрузки происходило разделение проводника с возникновением дугового процесса в момент разрыва.

В диапазоне от 5 до 9-кратной перегрузки в ходе проведения экспериментов визуально наблюдалось место, в котором в дальнейшем происходило разделение (разрыв) проводника. Эта зона проявлялась в виде более яркого локального свечения. Можно предположить, что в ней происходило предварительное плавление металла вплоть до разрыва проводника.

При перегрузке менее 8 – 9 крат отсутствовал выброс раскаленных частиц – происходило лишь разделение проводника в 1 – 2 точках с образованием оплавления на концах провода. При перегрузке свыше 8 – 9 крат наблюдался активный выброс расплавленного металла из зон разделения проводника на части.

Более высокая кратность перегрузки (свыше 13 – 14 крат) вызывала лишь незначительную карбонизацию изоляции с внутренней стороны, поскольку время от

начала действия сверхтока до момента разделения проводника резко уменьшалось и составляло величину менее 1 - 2 секунд. Следует отметить, что пламенное горение изоляции при этих кратностях перегрузки не наблюдалось – разрыв электрической цепи происходил быстрее, чем изоляция успевала загореться.

Необходимо отметить, что указанные выше закономерности воспроизводились на медных проводниках всех указанных в статье типоразмеров [36, 37].

3.2 Влияние величины тока КЗ на микроструктуру медного проводника

В результате проведенного анализа оплавлений медных проводников, подвергшихся воздействию токовой перегрузки, методом металлографии были выявлены признаки, характерные для данного электрического аварийного режима. Данные признаки приведены ниже.

Поверхностное оплавление

Поверхностное оплавление – оплавление проводника по его поверхности и вытянутое вдоль его оси (рисунок 3.6). Подобные оплавления, как правило, были протяженны. Их наблюдение при металлографическом исследовании зависело, в том числе, от того, какая площадь оплавленной зоны попала в поле зрения при пробоподготовке образца. Зона поверхностного оплавления проводника при всех кратностях перегрузки была насыщена оксидом меди (I).



Рисунок 3.6 – Межпроволочное и поверхностное оплавление многопроволочного проводника при токовой перегрузке кратностью более 3÷4

Межпроволочное оплавление

Межпроволочное оплавление – это совместное расплавление (сплавление) контактирующих проволок многопроволочного проводника при протекании по нему сверхтока.

При перегрузке кратностью более 3÷4 в многопроволочном проводнике наблюдалось расплавление отдельных участков проволок (рисунок 3.6). Участки расплавления при этом резко отличались по структуре от нерасплавленных по причине окисления меди и, как следствие, проволок, образования доэвтектической (Cu+э(Cu+Cu₂O)), эвтектической (э(Cu+Cu₂O)) или, реже, заэвтектической $(Cu_2O+3(Cu+Cu_2O)).$ Микроструктура структуры нерасплавленных проволок, как правило, состояла из крупных зерен меди с двойниками отжига внутри, образовавшихся в результате нагрева при протекании тока перегрузки по проводнику.

Пористость

Протекание по медному проводнику сверхтока, превышающего номинальное значение в 3÷4 и более раз, вызывало в нем образование пор различного размера. Так, в центральной части оплавления наблюдались поры крупного размера (макропоры), а также мелкие поры (микропоры) (рисунок 3.7). Подобного рода макро- и микропоры также образовывались внутри вздутий (рисунок 3.7).



а) Макропора и микропоры в оплавлении на конце медного проводника



б) Макропора, расположенная во вздутии на поверхности медного проводника

Рисунок 3.7 – Поры, образовавшиеся в различных зонах медного проводника, при токовой перегрузке кратностью более 3÷4

Оплавление границ зерен

Протекание тока перегрузки в медном проводнике вызывало оплавление межзеренных границ, концентрирующихся в приповерхностном слое провода (рисунок 3.8). В результате оплавления границ зерен появляются несплошности в материале проводника, которые, в отличие от пор, обладающих сферической ли овальной формой без острых углов, имеют произвольную форму с острыми углами.



а) Приповерхностный слой, в котором наблюдаются оплавления границ зерен (темные участки, отмеченные пунктиром). Панорамный снимок



б) Крупный план оплавлений границ зерен (темные участки, отмеченные стрелками)

Рисунок 3.8 – Оплавление границ зерен в приповерхностном слое нерасплавленной части медного проводника при токовой перегрузке кратностью более 3÷4

Оплавление межзеренных границ может вызвать также фрагментацию медного проводника, т.е. разделение его на части (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 – Оплавление границ зерен, вызвавшее фрагментацию медного проводника при токовой перегрузке кратностью более 3÷4. Проводник не разделился до конца

Содержание кислорода и форма зерна в оплавленных зонах

Содержание кислорода оплавлении медного В проводника, образовавшегося в результате токовой перегрузки, зависит от времени, в течение которого медь находится в расплавленном состоянии. На это, в свою очередь, оказывает влияние кратность тока перегрузки - чем она была выше, тем быстрее происходит разделении (разрыв) проводника на части и, соответственно, меньше времени медь находится в жидком состоянии. На графике, приведенном на рисунке 3.10а, показана зависимость времени от начала воздействия сверхтока на проводник до момента его разрыва от кратности тока перегрузки. График, приведенный на рисунке 3.10б, отражает зависимость концентрации кислорода в зоне оплавления от кратности тока перегрузки. Из сравнения данных графиков видно, что «пороговой» кратность перегрузки, при достижении которой резко снижается концентрация кислорода, является кратность, равная 8 – 10 (рисунок 3.10б). На рисунке 3.10а это соответствует времени протекания аварийного процесса в пределах 5 – 15 сек. Очевидно, при меньшем времени протекания аварийного режима реакция разогретой (расплавленной) меди с кислородом пройти не успевает.

При перегрузках менее 8 ÷ 9 крат содержание кислорода в зоне оплавления, а также на других оплавленных участках медного проводника (межпроволочные и поверхностные оплавления, вздутия и т.д.), варьировалось от 0,10 до 0,39 % и более (рисунок 3.11а). При кратностях перегрузки более 8÷9 концентрация кислорода в большей части объема оплавления оставалась на исходном уровне - 0,05 % (рисунок 3.11б, в, г, д, е).

Зерна в оплавленных зонах при токовой перегрузке кратностью более 3÷4 имели различную форму и ориентировку и могли быть дендритными, вытянутыми (столбчатыми) или равноосными.

54



а) Зависимость времени от начала воздействия сверхтока на проводник до момента его разрыва от кратности тока перегрузки

б) Зависимость концентрации кислорода в оплавлении от кратности тока перегрузки

Рисунок 3.10 – Графики, отражающие изменение различных параметров в зависимости от кратности тока перегрузка



б) $\kappa = 9$; $O_2 \approx 0.05 \%$



в) $\kappa = 12$; $O_2 \approx 0.05$ %

г) $\kappa = 14; O_2 \approx 0.05 \%$



д) $\kappa = 17$; $O_2 \approx 0.05 \%$

e) $\kappa = 20$; $O_2 \approx 0.05 \%$

Рисунок 3.11 - Микроструктуры оплавлений медных проводников, образовавшихся при различных кратностях перегрузки (к), и содержание кислорода в них

Следует особо отметить, что содержание кислорода и форма зерна могут значительно отличаться в пределах оплавления. Например, на рисунке 3.12 показано оплавление, основной объем которого состоит из равноосных зерен при концентрации кислорода 0,05 %. Однако, в оплавлении имеется приповерхностный слой толщиной порядка 0,1 мм, структура которого состоит из дендритных зерен при содержании кислорода 0,2 %. Толщина этого слоя, по видимому, зависит от многих факторов (кратность сверхтока, газообразный состав окружающей среды и т.д.) и может значительно варьироваться.





Описанные в разделе 3.2 повреждения, образующиеся при протекании по медному проводнику сверхтока, а также данные металлографического анализа, могут быть использованы при экспертных исследованиях для оценки кратности тока перегрузки [34, 35, 43].

3.4 Вздутия и механизм их образования

В результате проведения экспериментальных исследований было обнаружено, что вздутия образуются только *на проводниках в изоляции* (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Экспериментальные данные о наличии вздутий на медных многопроволочных и однопроволочных проводниках в изоляции и без изоляции при токовой перегрузке различной кратности

<i>I</i> , A	<i>К</i> , крат.	В изо	ляции	Без изоляции	
		одн.	мног.	одн.	мног.
150	5	нет	нет	нет	нет
210	7	ед.	нет	нет	нет

б) Крупный план участка оплавления

Рисунок 3.12 – Участок оплавления, возникшего в результате токовой перегрузки кратностью более 3÷4: - приповерхностный слой состоит из зерен дендритной формы при содержании кислорода порядка 0,2 %; - центральный участок состоит из зерен равноосной формы при содержании кислорода порядка 0,05 %

<i>I</i> , A	<i>К</i> , крат.	В изо	ляции	Без изоляции	
		одн.	МНОГ.	одн.	мног.
270	9	ед.	ед.	нет	нет
330	11	MH.	MH.	нет	нет
390	13	MH.	MH.	нет	нет
450	15	MH.	MH.	нет	нет
510	19	MH.	MH.	нет	нет

Примечание к таблице 3.2: ед. – единичные; мн. – множественные; мног. – многопроволочные проводники; одн. - однопроволочные проводники.

Характерная поверхность проводников, находившихся в изоляции и без нее в момент протекания сверхтока, показана на рисунке 3.13.



а) проводник, находившийся в изоляции в момент протекания сверхтока



б) проводник, находившийся без изоляциив момент протекания сверхтока

Рисунок 3.13 – Поверхность медного проводника, подвергшегося воздействию токовой перегрузки 13 крат

На проводниках без изоляции формировались только дефекты в виде поверхностных оплавлений, утолщений и утончений. Также, при определенных значениях кратности токовой перегрузки, возникала фрагментация проводника,

появление которой не зависело от присутствия или отсутствия изоляции на проводе.

Таким образом, наличие на поверхности медного проводника вздутий металла указывает на то, что на момент протекания по нему сверхтока проводник на данном участке находился в изоляции, подвергшейся термическому воздействию не выше температуры 100 - 140 °C (температурный диапазон начала термической деструкции поливинилхлорида). Это дает криминалистически значимую информацию об условиях протекания аварийного режима работы электросети.

Как правило, данные дефекты имеют шарообразную форму, при этом в отдельных случаях наблюдается и произвольная форма вздутий. Данные следы токовой перегрузки обладают относительно крепким сцеплением с поверхностью проводника, однако, могут быть удалены при механическом воздействии.

Количество вздутий и их размеры

Результаты оценки количества вздутий, образующихся на медном проводнике при протекании по нему сверхтока, приведены в таблице 3.3. Измерения проводились на участке провода длиной 30 см.

<i>I</i> , A	К, ед.	Однопроволочные проводники	Многопроволочные проводники
150	5	нет	нет
210	7	1 - 5	нет
270	9	5 - 10	1 - 5
330	11	10 - 15	5 - 10
390	13	15 - 25	10 - 25
450	15	25 - 35	25 - 35
510	19	более 35	более 35

Таблица 3.3 – Количество вздутий в зависимости от кратности тока перегрузки на участке медного проводника длиной 30 см

Далее было рассчитана величина удельного количества вздутий, на единицу длины проводника. Зависимость этой величины от кратности тока перегрузки приведена на графике (рисунок 3.14).



Рисунок 3.14 – График зависимости удельного количества вздутий на однопроволочном и многопроволочном медном проводнике от кратности тока перегрузки

Единичные вздутия у многопроволочных проводников начинают появляться при 9 кратной токовой перегрузке, у однопроволочных - при 7 кратной. Видно, что количество вздутий последовательно увеличивается с возрастанием кратности токовой перегрузки. При этом, на однопроволочных проводниках их образуется больше, чем на многопроволочных. Однако, при высоких кратностях сверхтока, свыше 18 -19, количество вздутий на обоих типах проводников становится приблизительно одинаковым.

Размеры вздутий варьируются в зависимости от кратности тока перегрузки и составляют величину в диапазоне $0,08 \div 4,12$ мм. По гистограммам распределения размеров вздутий, было замечено, что имеется два максимума, один из которых находился в диапазоне $0,08 \div 1$ мм, а второй – $1 \div 4,12$ мм (рисунок 3.15, таблица 3.4). При этом, приблизительно, от 0,9 до 1 мм наблюдалось резкое уменьшение, либо полное отсутствие вздутий такого размера. По этой причине

вздутия условно были разделены на два вида: «мелкие» - диаметром менее 1 мм, и «крупные» - диаметром более 1 мм.



Рисунок 3.15 – Гистограмма распределения количества вздутий по типам (размерам), основанная на данных из таблицы 3.4

Таблица 3.4 – Данные о количестве вздутий на медном однопроволочном проводнике при 11-кратной токовой перегрузке

Тип	Мин, мм	Макс, мм	Кол-во	%
1	0,18	0,45	11	29,7
2	0,45	0,72	10	27,0
3	0,72	0,99	8	21,6
4	0,99	1,26	3	8,1
5	1,26	1,53	1	2,7
6	1,53	1,8	2	5,4
7	1,8	2,07	3	8,1
8	2,07	2,34	3	8,1
9	2,34	2,6	1	2,7
10	2,6	2,87	1	2,7

Зависимость размеров «мелких» и «крупных» вздутий однопроволочных медных проводников от кратности тока перегрузки приведена на графике (рисунок 3.16).



Рисунок 3.16 – График зависимости размеров вздутий на медных однопроволочных проводниках от кратности тока перегрузки

Увеличение тока перегрузки медных проводов сопровождается уменьшением диаметров вздутий, за исключением «крупных» вздутий на многопроволочных проводниках, размер которых растет, при этом, их количество увеличивается. У однопроволочных проводников количество «крупных» вздутий, наоборот, сокращается при повышении тока перегрузки.

Можно предположить следующий механизм образования вздутий на поверхности медного проводника при перегрузке. В литературе [1] отмечается, что в месте прилегания изоляции к разогретой токами перегрузки жиле начинают выделяться газообразные продукты горения изоляции, при этом, тонкий ее внутренний слой карбонизируется, а наружный слой, за счет низкой теплопроводности, еще не успевает достаточно нагреться. В результате этого процесса под слоем изоляции создается давление, вызывающее движение металла

проводника [1]. Это явление приводит к возникновению на поверхности медного проводника образований, как правило, сферической формы - вздутий. Уменьшение размеров вздутий, по видимому, вызвано уменьшением времени их формирования. Чем выше сверхток, тем быстрее проводник нагревается и разрушается (разделяется на части) и, соответственно, в течение меньшего времени формируется расплавленный металл проводника.

Микроструктура вздутий

Металлографический анализ вздутий показал, что характерной особенностью микроструктуры вздутий как однопроволочных, так и многопроволочных медных проводников, образовавшихся при токовой перегрузке различной кратности, является *наличие макропоры*, занимающей значительный объем внутри вздутия (рисунки 3.17, 3.18). При этом, по всему объему вздутия могут присутствовать и множественные микропоры.



Рисунок 3.17 - Микроструктура крупного вздутия, образовавшегося при 13-кратной токовой перегрузке



Рисунок 3.18 – Микроструктура «мелких» вздутий, образовавшихся при 15-кратной токовой перегрузке

Независимо от кратности тока перегрузки большинство вздутий представляют собой микроструктуру меди с доэвтектическим состоянием, при концентрации кислорода около 0,05 % (рисунок 3.19). В отдельных случаях концентрация кислорода достигала значения 0,1 %.

В пределах вздутия, в любых сочетаниях, могут присутствовать зерна меди дендритно-ячеистой, столбчатой и равноосной формы. Корреляции между формой зерна меди и кратностью тока перегрузки выявлено не было.

Между проводником и вздутием наблюдается видимая граница перехода. Следует отметить, что на видимость границы перехода между вздутием и проводником влияет участок образца, попавший в поле зрения шлифа при пробоподготовке.



a) Крупные и мелкие равноосные зерна, дендритно-ячеистые зерна



б) Крупные и мелкие равноосные зерна, $O_2 \sim 0,05~\%$



 в) Крупные равноосные зерна, O₂ ~ 0,05 %



г) Крупные и мелкие равноосные зерна, вытянутые зерна $O_2 \sim 0.05 \%$

Рисунок 3.19 – Участки микроструктур вздутий с различной формой зерна и концентрацией кислорода



Продолжение рисунка 3.19 – Участки микроструктур вздутий с различной формой зерна и концентрацией кислорода

Очевидно, что вздутия при визуальном экспертном исследовании могут быть ошибочно приняты за частицы металла, образовавшиеся при разлете искр в ходе короткого замыкания (КЗ). Микроструктура таких частиц приведена на рисунке 3.20. Отметим, что основным отличием их структуры от структуры вздутий является именно отсутствие макропоры. Кроме того, содержание кислорода в данных частицах значительно больше 0,1 % [34, 35].



а) Панорамный снимок, $O_2 \sim 0,20~\%$

Рисунок 3.20 – Характерная микроструктура частиц, образовавшихся в результате разлета искр при КЗ

3.5 Влияние отжига на микроструктуру оплавлений медных проводников

На реальном пожаре оплавления (как электродуговые, таки вызванные перегрузкой), как правило, подвергаются дополнительному нагреву (отжигу). Для того, чтобы выяснить, как и насколько данный фактор влияет на сформировавшуюся структуру оплавления и его характерные признаки, были проведены соответствующие исследования.

Влияние отжига на оплавления, вызванных токовой перегрузкой

Содержание кислорода

На содержание кислорода в оплавлении, как показано в работе [35], оказывает влияние кратность сверхтока. При токовых перегрузках свыше 9 – 11

крат концентрация кислорода в основном объеме оплавления не превышает исходного значения 0,05 %. Микроструктура оплавлений, образовавшихся при токовой перегрузке различной кратности, показаны в работе [35]. Для таких оплавлений характерно доэвтектическое и эвтектическое состояние меди, т.е. содержание кислорода находится в пределах 0,05 – 0,39 %.

Эксперименты по отжигу проводились с оплавлениями, образовавшимися при различных кратностях токовой перегрузки – 8 и 12 и 16 крат. При 8-кратной перегрузке концентрация кислорода в зоне оплавления составляет величину порядка от 0,20 до 0,39 %, при 12-кратной перегрузке – 0,05 – 0,15 %. Микроструктуры исходных оплавлений, т.е. не подвергшихся дополнительному температурному воздействию, приведены в работе [35].

В ходе исследования было установлено, что отжиг оплавлений, вызванных 8и 12-кратной перегрузкой, до определенных температур вызывает уменьшение содержания кислорода в них. При температурном воздействии 700 – 750 °C заметных изменений данного параметра не наблюдается. Однако, нагрев до 800 °C сопровождается незначительным уменьшением содержание кислорода в оплавлении (рисунок 3.21 a, б). Дальнейшее увеличение температуры до 900 °C вызывает уменьшение содержания кислорода до 0,05 – 0,10 % (рисунок 3.21 в, г). При температуре отжига 1000 °C в течение 20 и 40 минут концентрация кислорода в оплавлении составляет 0,05 % (рисунок 3.21 д, е).



67



Рисунок 3.21 – Влияние отжига на содержание кислорода в оплавлении медного проводника, образовавшегося в результате 8-кратной токовой перегрузки, 200^x

Размер и форма зерен

Протекание по проводнику сверхтока, превышающего номинальное значение, вызывает в пределах оплавления образование зерен меди различной формы и ориентировки к поверхности оплавления. Мог наблюдаться зерна дендритной, столбчатой и равноосной формы [31].

Отжиг при температурах 800 - 900 °C в течение 20 и 40 мин не вызывает значительных в форме дендритных зерен, наблюдается лишь укрупнение равноосных зерен меди с появлением двойников отжига внутри. Повышение температурного воздействия до 1000 °C сопровождается исчезновением дендритной структуры с нивелированием преимущественной ориентировки

(рисунок 3.21 д, е) и значительным укрупнением равноосных зерен меди, по размерам сопоставимые с сечением проводника [31].

Граница между оплавлением и проводником

Оплавления, образующиеся при протекании по проводнику сверхтока, имеют четкую границу переходу к неоплавленной части провода [35]. Эта граница наблюдается при металлографическом исследовании. Эксперименты с отжигом таких оплавлений показали, что данная граница сохраняется при отжиге до 800 – 900 °C и в отдельных случаях наблюдается при отжиге в 1000 °C. В целом же, высокотемпературный отжиг при 1000 °C нивелирует эту границу (рисунок 3.22).



a) 800 °C

б) 900 °C



в) 1000 °С

Рисунок 3.22 – Влияиние отжига на видимость границы между проводником и оплавлением (отмечена пунктиром), возникшим при 8-кратной токовой перегрузке, 200^x

Пористость

В пределах оплавлений и на участках проводника присутствовуют поры различных размеров, в некоторых случаях сопоставимые с диаметром оплавления. Какого либо влияния температуры и времени отжига на пористость обнаружено не было.

Влияние отжига на дуговые оплавления, вызванные коротким замыканием

Оплавления, образующиеся при электродуговом процессе короткого замыкания, как правило, при металлографическом исследовании представляют собой структуру быстрой кристаллизации, а именно, сильно вытянутые зерна, ориентированные вдоль оси проводника. Концентрация кислорода, при этом, в зоне оплавления не превышает 0,05 %.

Отжиг оплавлений, вызванных электродуговым процессом, при 700 - 800 °C существенных изменений в форму зерна не вносит (рисунки 3.23, 3.24).



Рисунок 3.23 – Микроструктура оплавления медного проводника после КЗ и отжига до 700 °C, панорамный снимок, 50^x



а) без отжига

б) 800 °C

Рисунок 3.24 - Микроструктура сплавления медных проводников, образовавшегося при КЗ. Без отжига (а) и с отжигом при 800 °С в течение 40 мин (б) При температуре 900 °С приводит формированию зерен равноосной формы, при этом, появляются двойники отжига (рисунок 3.25). Увеличение температуры до 1000 °С вызывает образование по всему объему оплавление границ зерен по всему объему оплавления (рисунок 3.26).



панорамный снимок, 50^х



панорамный снимок, 50^х

71



a) без отжига, 200^x

б) 900 °C, 200^х





а) без отжига, 50^х

б) без отжига, 200^х


в) 1000 °C, 50^х

г) 1000 °C, 200^x



Известно, что электродуговой процесс за счет локальности воздействия способствует формированию между оплавлением и проводником четко видимой границы. При отжиге свыше 900 °C данная граница не наблюдается (рисунок 3.25).

Таким образом, при температурном воздействии 900 °С и выше нивелируются признаки формирования оплавления в результате электродугового процесса короткого замыкания.

На основании проведенных экспериментальных исследований установлено, что отжиг оплавлений медных проводников, вызванных сверхтоками, при определенных температурах оказывает влияние на их микроструктуру и, соответственно, на сохранность признаков их природы.

Отжиг при температурах до 800 °С не оказывает существенного влияния на сохранность признаков природы оплавлений.

Нагрев до 900 – 1000 °C вызывает уменьшение содержания кислорода в оплавлении до 0,05 %. При отжиге до 1000 °C во всем объеме оплавления возникают оплавления границ зерен. Возникает частичное видоизменение дендритной структуры вплоть до полного ее исчезновения при 1000 °C.

Признаки воздействия дуги короткого замыкания на медный проводник нивелируются при температурном воздействии 900 °C и выше. Признаки оплавлений, образовавшихся при токовой перегрузке, исчезают при отжиге 1000 °C и выше [31].

3.6 Анализ оплавлений различной природы методом сканирующей электронной микроскопией

В работе [29] была описана возможность применения СЭМ при анализе оплавлений медных проводников. Указывалось, что данный метод позволяет получать информацию о природе оплавления, дифференцировать КЗ и внешнее тепловое воздействие, а так же условия, при которых оно сформировалось, путем анализа внешнего вида поверхности и толщины оксидной пленки.

В соответствии с [29], основными признаками оплавления, образовавшегося в результате КЗ, является наличие на его поверхности т.н. кратеров и лунок, наблюдаемых при увеличениях более 500 ^х (рисунок 3.27а).



а) короткое замыкание



б) токовая перегрузка



в) токовая перегрузка

г) внешнее тепловое воздействие

Рисунок 3.27 – Поверхность оплавлений различной природы, 600^х

При этом, на поверхности оплавлений, образовавшихся в результате внешнего теплового воздействия подобного рода следов не наблюдается (рисунок 3.27в).

Проведенные в рамках данной диссертационной работы исследования подтвердили наличие основных признаков оплавлений, образовавшихся в результате КЗ, описанных в работе [29].

В результате проведенных исследований было также установлено, что на поверхности оплавлений, образовавшихся в результате воздействия токовой перегрузки, обнаруживаются либо кратеры и лунки (рисунок 3.27б), либо блочная структура, вызванная, вероятно растрескиванием (рисунок 3.27в).

Определение толщины оксидной пленки при ПКЗ и ВКЗ

При нагреве на поверхности медного проводника образуется оксидная (поверхностная) пленка, которая отчетливо видна при увеличениях от 500^x, поскольку не плотно прилегает к поверхности металла. Из работы [29] известно, что толщина оксидной пленки при ПКЗ и ВКЗ отличается в 3 и более раз. Однако конкретны численные данные не указываются, что затрудняет экспертную оценку результатов исследования на практике.

В настоящей работе определены численные значения толщин, характерные для проводников, оплавленных при ПКЗ и ВКЗ.

На рисунке 3.28 видна разница в толщине оксидной пленки, образованной при ПКЗ и ВКЗ.







Рисунок 3.28 – Вид оксидной пленки проводника, оплавленного при ПКЗ и ВКЗ (2000 ^x). Отмечена толщина пленки на отдельных участках

Соответствующие измерения показали, что толщина оксидной пленки у проводников, оплавленных при ПКЗ, составляет 6 - 20 мкм, а у проводников оплавленных в результате ВКЗ данное значение не превышает 2 - 5 мкм.

Необходимо, однако, отметить, что последующий отжиг медных проводников, который может иметь место в ходе пожара, вызывает рост толщины оксидной пленки. В результате проведенных исследований была получена экспериментальная зависимость толщины оксидной пленки от температуры нагрева, у проводников, оплавленных при ПКЗ и ВКЗ (рисунок 3.29). Из графика видно, что толщина оксидной пленки у исходных проводников, оплавленных при ПКЗ и ВКЗ, различная. При дальнейшем нагреве образцов, оплавленных при ВКЗ, до 600 °C, толщина оксидной пленки достигает такого же значения, как у

проводников оплавленных при ПКЗ, и продолжает увеличиваться при дальнейшем нагреве проводника до 900 °C.

Таким образом, можно констатировать, что дифференциация ПКЗ - ВКЗ по данному признаку возможна при нагреве проводнике не выше 600 °C.



Рисунок 3.29 - Зависимость среднего значения толщины оксидной пленки при ПКЗ и ВКЗ от температуры нагрева. Время нагрева 20 мин.

Исследование сохранности признаков, дифференцирующих ПКЗ - ВКЗ

В работе [29] указывалось, что основным признаком, дифференцирующим первичное и вторичное КЗ при анализе методом СЭМ, является вид структуры поверхности оксидной пленки.

Результаты данной диссертационной работы подтвердили существование такого дифференцирующего признака.

У проводников, оплавленных в условиях «до пожара», структура поверхности имеет вид непрерывной сетки, образованной сильно искривленными кристаллами (рисунок 3.30a) [29]. Проводники, оплавленные в условиях пожара, имеют структуру, образованную прямыми и закругленными кристаллами, лежащими на поверхности без определенной ориентировки (рисунок 3.30в).

Однако нагрев медных проводников свыше 600 °C вызывал не только увеличение толщины оксидного слоя свыше 20 мкм, но и приводил к полному видоизменению структуры поверхности оплавления (рисунок 3.30б, г).



Рисунок 3.30 - Структура поверхности оплавлений медных проводников, сформировавшихся при различных условиях, 1500^х

Таким образом, можно констатировать что дифференцирующий признак ПКЗ

- ВКЗ, выявляемый методом СЭМ, полностью нивелируется при температуре свыше 600 °С.

В таблице 3.5 систематизированы морфологические признаки первичного и вторичного КЗ, выявленные методом СЭМ.

Таблица 3.5 – Дифференцирующие признаки ПКЗ и ВКЗ на основании совокупной оценки морфологических признаков, выявляемых методом электронной микроскопии

Толщина оксидной	Структура поверхности	Вывод
пленки, мкм		
$\leq 2 \div 5$	Сетка с сильно искривленными кристаллами	НПВ
$\leq 2 \div 5$	Прямые и закругленные кристаллы	K3 + отжиг \leq 500 °C
6 ÷ 20	Сетка с сильно искривленными кристаллами	ПКЗ + отжиг < 600 °C
6 ÷ 20	Прямые и закругленные кристаллы	ВКЗ + отжиг < 600 °C
> 20	Сетка с сильно искривленными кристаллами	K3 + отжиг > 600 °C

Очевидно, что полученные данные существенно усложняют экспертную оценку результатов исследования на практике. Тем не менее, они объективно отражают последствия протекающих процессов окисления и потому требуют учета [40].

3.7 Особенности, возникающие при анализе оплавлений медных проводников методом рентгенофазового анализа

Как известно, в соответствии с существующей методикой экспертного исследования оплавлений медных проводников [24, 29], дифференциация условий их формирования выполняется путем проведения, в частности, рентгенофазового анализа. Данная методика предполагает определение условий формирования оплавления, возникшего в результате дугового процесса КЗ.

Для определения возможности применения данного метода анализа к оплавлениям, возникшим при токовой перегрузке, был проведен их рентгенофазовый анализ [71, 72].

Известно, что при определении первичности (вторичности) короткого замыкания методом РСА, исходя из расчета рентгенограмм, вычисляется значении коэффициента к по следующей формуле:

$$\kappa = \frac{I(Cu_2O)_A / I(Cu)_A}{I(Cu_2O)_B / I(Cu)_B}$$
(3.1),

где I(Cu₂O)_A и I(Cu)_A - интегральные интенсивности соответственно линий Cu₂O (111) и Cu (111) на участке А, прилегающем к месту оплавления;

I(Cu₂O)_В и I(Cu)_В - интегральные интенсивности соответственно линий Cu₂O (111) и Cu (111) на участке В, удаленном от места оплавления.

На основании этого расчета делается вывод об условиях, при которых образовалось исследуемое оплавление [24, 29]:

- Признаком формирования оплавления в условиях «до пожара» (ПКЗ) является превосходство I(Cu₂O)_A/I(Cu)_A к I(Cu₂O)_B/I(Cu)_B в 2 и более раз.
- Признаком формирования оплавления в условиях пожара (ВКЗ) является значение 0,5 и менее.
- Результат между значениями 0,5 и 2 не дает возможности дифференцировать условия формирования оплавления данным методом.

На рисунках 3.31, 3.32, 3.33 приведены примеры дифрактограмм медных проводников с оплавлениями, возникших при различных кратностях токовой перегрузки.



б) Участок В

Участок		А	Участок В		Отношение	
J Cu	J Cu ₂ O	J Cu2O/ J Cu	J Cu	J Cu ₂ O	J Cu2O/ J Cu	$(J_{ACu_{2}0}/J_{ACu})/$
						$(J_{B}Cu_{2}0/J_{B}Cu)$
2212	1187	0.21	2911	109	0.04	5.2

Рисунок 3.31 – Дифрактограммы различных участков медного проводника, подвергшегося 6кратной токовой перегрузке, и результаты обработки дифрактограмм







б) Участок В

	Участок	А	Участок В		с В Отношение		
J Cu	J Cu ₂ O	J Cu2O/ J Cu	J Cu	J Cu ₂ O	J Cu2O/ J Cu	$(J_{ACu_20}/J_{ACu})/$	
						(J_BCu_20/J_BCu)	
1886	472	0.25	2507	602	0.24	1.0	

Рисунок 3.32 – Дифрактограммы различных участков медного проводника, подвергшегося 16кратной токовой перегрузке, и результаты обработки дифрактограмм



а) Участок А



о) участок В	5
--------------	---

	Участок	А	Участок В			Отношение
J Cu	J Cu ₂ O	J cu_20/ J cu	J Cu	J Cu ₂ O	J Cu2O/ J Cu	$(J_{ACu_20}/J_{ACu})/$
						(J_BCu_20/J_BCu)
2384	125	0.05	2961	359	0.12	0.4

Рисунок 3.33 – Дифрактограммы различных участков медного проводника, подвергшегося 10кратной токовой перегрузке, и результаты обработки дифрактограмм

В таблице 3.6 систематизированы результаты расчета коэффициента *к* в зависимости от кратности токовой перегрузки, основанные на анализе дифрактограмм тридцати образцов.

Таблица 3.6 – Значения коэффициента к в зависимости от кратности токовой перегрузки

Кратность	к, ед.		
перегрузки, ед.	серия 1	серия 2	
5	0,8	1,0	
6	0,1	14,3	
7	0,1	0,6	
8	1,9	0,1	
10	0,1	0,4	
11	0,8	0,2	
12	19,0	13,6	
13	2,0	1,7	
14	1,4	1,0	
15	1,7	3,0	

16	0,3	0,5
17	1,5	0,4
18	0,1	0,2
19	1,6	4,3
20	3,4	2,0

На рисунке 3.34 показан график, отражающий изменение коэффициента к с увеличением кратности токовой перегрузки, воздействовавшей на медные проводники.



Рисунок 3.34 – График, отражающий изменение коэффициента *к* с увеличением температуры отжига медных проводников с оплавлениями, возникшими в результате первичного и вторичного КЗ

Большая часть значений коэффициента к (более 80 %) находится либо в зоне неопределенности (т.н. НПВ), либо в зоне, в которую попадают оплавления, образовавшиеся в условиях вторичного КЗ. В зону первичного КЗ попало менее 20 % значений коэффициента к. Какая-либо корреляция между кратностью сверхтока и коэффициентом к не обнаружилась. Следует отметить, однако, что при 12-кратной токовой перегрузке наблюдалось резкое увеличение коэффициента к.

Таким образом, проведя рентгенофазовый анализ оплавлений медных проводников, возникших в результате токовой перегрузки, можно утверждать, что

данный метод непригоден для дифференциации условий формирования подобных оплавлений. Можно предположить, что причина этого связана с механизмом формирования оплавлений, возникших при коротком замыкании и при токовой перегрузке [41].

3.8 Механизм формирования следов протекания по медному проводнику сверхтока

При протекании сверхтока по проводнику происходит нагрев проводника. При достижении температуры плавления меди происходит постепенное плавление, переход в жидкую фазу, токоведущей жилы, которое может в дальнейшем привести к разрыву проводника.

В ходе проведения экспериментов было выявлено, что при кратности токовой перегрузки от 4 до 16 на медном проводнике образуются утолщения и утончения - шейки. При кратности тока перегрузки свыше 16, на проводниках утолщения и утончения (шейки) не образуются, поскольку время от начала действия сверхтока до момента разделения проводника составляет менее 1 - 2 секунд. За данный период времени медный проводник не успевает достичь температуры плавления, без которой образование утолщений и утончений не возможно.

При изучении динамики образования утолщений И утончений на поверхности проводника установлено, что повреждения формируются после разрыва, то есть в процессе остывания проводника. В таблице 1, в качестве наглядного примера приведены фотоснимки проводника в процессе протекания по нему сверхтока с 14 кратной перегрузкой. Как видно из фотоснимков, на 0,60 сек после разрыва проводника, сечение еще не изменилось и остается примерно одинаковым на зафиксированном участке. Уже на 0,68 сек, на поверхности проводника начинается движение массы расплавленного металла. По мере остывания проводника происходит увеличением диаметра сечения в одном месте и потеря сечения в другом. К 9,28 сек, на поверхности медного проводника сформировалось утолщение.

Исходя из результатов морфологического анализа полученных образцов и изучения динамики протекания процесса перегрузки, выдвинуто предположение о том, что формирование расплавленного металла (жидкой фазы) на поверхности проводника (твердой фазы) происходит под действием поверхностного натяжения.

Как известно, поверхностное натяжение – это стремление вещества (жидкости или твердой фазы) уменьшить избыток своей потенциальной энергии на границе раздела с другой фазой. В случае жидкой поверхности раздела фаз, поверхностное натяжение можно рассматривать также как силу, стремящуюся сократить поверхность до минимума при заданных объемах [2, 6].

Жидкости, при отсутствии внешнего воздействия, благодаря поверхностному натяжению принимают форму шара, что соответствует минимальной поверхности и минимальному значению свободной поверхностной энергии. Среди жидкостей наибольшее значение поверхностного натяжения имеют расплавы металлов. Поверхностное натяжение при повышении температуры, уменьшается, при этом площадь раздела фаз увеличивается [2, 6].

Таким образом, после разрыва проводника, за счет сил поверхностного натяжения жидкая - расплавленная часть проводника пытается сократить поверхность раздела фаз до минимума и приобрести шарообразную форму, то есть утолщение, что наблюдается на проводнике (рисунок 3.35).



86



Рисунок 3.35 – Формирование расплавленного металла на поверхности медного проводника при токовой перегрузке 14 крат

На участке проводника, рядом с местом формирования утолщения, наоборот, за счет оттока жидкой поверхностной фазы происходит уменьшение сечения проводника - образование утончений - шеек (рисунок 3.36).



Рисунок 3.36 – Утолщения и утончения образовавшиеся на поверхности медного проводника в результате протекания токовой перегрузки кратностью свыше 4 ÷ 5

В случае, когда участок проводника плавится по всей площади сечения, происходит разрыв. Данный механизм разрыва проводника справедлив при кратности токовой перегрузки, не превышающей 16 крат.

Исходя из результатов проведенных опытов, высказано предположение о том, что при кратности тока перегрузки в диапазоне 12-16 крат разрыв проводника происходит как вследствие оплавления, так и вследствие проявления, так называемого пинч-эффекта (эффект самосжатия разряда). Механизм образования разрыва зависит от скоротечности протекания того или иного процесса.

Как известно, пинч-эффект – это сжатие токового канала проводника под действием магнитного поля, индуцированного самим током. При нормальном режиме работы пинч-эффект не возникает, т.к. сжатию магнитного поля препятствует газокинетическое давление проводящей среды, обусловленное тепловым движением eë частиц, силы ЭТОГО давления направлены перпендикулярно оси токового канала (рисунок 3.37а). Однако при достаточно большом больше токе перепад магнитного давления становится газокинетического, вследствие чего токовый канал сжимается, возникает пинчэффект, что приводит к деформации проводящего канала [2, 54], вплоть до разрушения проводника (рисунок 3.37б).

а) Образование магнитного поля при протекании тока по проводнику



б) Сжатие токового канала индуцированным магнитным полем, вследствие протекания сверхтока (пинч-эффект)

Рисунок 3.37 – Действие магнитного поля на токовый канал (проводник) Как было указано выше, при кратностях тока перегрузки выше 16 - 18 крат утолщения и утончения не успевают сформироваться. Разрыв проводника при данных кратностях перегрузки происходит только вследствие пинч-эффекта.

В ходе проведения экспериментов было установлено, что при токовой перегрузке 12 крат и выше, может происходить разделение проводника на несколько частей.

На рисунке 3.38 приведены фотоснимки, на которых зафиксирован процесс фрагментации проводника.



д) 2,32 с

Рисунок 3.38 – Разделение медного проводника в нескольких точках в ходе токовой перегрузки 14 крат (овалами отмечен участок разделения проводника)

Как видно из фотоснимков, на участке, отмеченном кругом, происходит постепенная потеря сечения. На 0,28 сек, от момента обнаружения визуальных признаков повреждения проводника, происходит разрыв токоведущей жилы. В месте разрыва образуется «мостик» который замыкает электрическую цепь для прохождения тока. К 0,4 сек, происходит разрыв проводника в другом месте, а образовавшийся «мостик» пропадает. В результате данного процесса образуются отдельные фрагменты с оплавлением жилы с двух концов.

Описанное явление можно объяснить тем, что в месте первичного разрыва проводника (электрической цепи) при увеличении тока до определённого уровня в воздухе между частями проводника возникает электрический пробой, зависящий от расстояния между ними. Данный процесс приводит к образованию плазмы между проводниками и горению дуги. Во время пробоя между проводниками возникает искровой разряд, который импульсно замыкает электрическую цепь, образуя «мостик» для возобновления прохождения тока [76]. Далее под действием электромагнитных сил происходит разрыв проводника в другом месте.

В таблице 3.7 систематизированы оба механизма формирования повреждений медного проводника в зависимости от кратности токовой перегрузки.

Таблица 3.7 – Механизм формирования повреждений медного проводника в зависимости от кратности токовой перегрузки

Кратность перегрузки	Механизм формирования повреждений			
nipullio el 2 neperpyolar	плавление	пинч-эффект		
4 - 12	+	-		
12 - 16	+	+		

90

Более 16	-	+

91

При морфологическом анализе было обнаружено, что поверхность оплавления, образовавшегося в результате токовой перегрузки, имеет блочную структуру (рисунок 1б). Вероятно, такая структура может образовываться при первом механизме формирования оплавлений – за счет действия сил поверхностного натяжения при плавлении, когда отсутствует дуговой разряд.

В случае же, когда оплавление образуется по второму механизму, за счет пинч-эффекта, на поверхности при морфологическом исследовании наблюдаются отдельные лунки (рисунок 1в), как и при коротком замыкании.

Основные выводы по главе 3

В ходе проведения экспериментов по моделированию пожароопасных аварийных электрических режимов и исследования визуальным и инструментальными методами оплавлений медных проводников были получены следующие результаты:

- 1 Действие тока перегрузки приводит 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.
- 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.е. к фрагментации.
- 5 Количественная оценка следов токовой перегрузки (вздутий, утолщений, шеек и фрагментации) показала их зависимость от кратности тока перегрузки. Так 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, макропора 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 Дано обоснование механизма формирования оплавлений медного проводника в зависимости от кратности токовой перегрузки, а именно установлено, что:

- при кратности токовой перегрузки от 4 до 16, под действие сил поверхностного натяжения, на медном проводнике образуются утолщения и утончения – шейки;

- при кратности токовой перегрузки от 4 до 16 разрыв проводника происходит в результате плавления;

- при кратности токовой перегрузки свыше 12 разрыв проводника происходит в результате пинч-эффекта;

- при кратности тока перегрузки в диапазоне 12-16 крат разрыв проводника происходит как вследствие плавления, так и вследствие пинч-эффекта.

4 ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ СЛЕДОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ И ВНЕШНЕГО ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ЛАТУННЫХ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ИЗДЕЛИЯХ

4.1 Признаки КЗ и внешнего теплового воздействия при морфологическом анализе методом СЭМ

В литературе [52, 57, 70] приводятся сведения о том, что в процессе электросварки на поверхности алюминиевых и медных проводников, в месте оплавления электрической дугой, а также в зоне, прилегающей к месту оплавления, образуются специфические микродефекты оксидной пленки. Данные микродефекты, имеющие вид «лунок» и «волокнистых структур», как показали исследования, возникают и при КЗ электрических проводников. Они хорошо различимы на поверхности при помощи электронного микроскопа при увеличениях более 2000 крат. При тепловом воздействии пожара на проводники подобного рода дефектов не образуется. На этом принципе основано установление причины разрушения проводников тока из меди и алюминия.

Можно было предположить, что на латунных изделиях также должны формироваться структуры, характерные для дуговых процессов.

В ходе проведения морфологического исследования латунных контактов методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) при увеличениях более 2000^{x} было обнаружено. что на поверхности латунного контакта. не подвергавшегося каким-либо воздействиям, наблюдается типичная поверхность металла со множеством неровностей и следами механического воздействия (рисунок 4.1а). При этом, 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. 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» («первичное» КЗ, рисунок 4.1б), так и в условиях «в ходе пожара» («вторичное» КЗ, рисунок 4.1в). Размер шарообразных частиц варьировался от 0,1 до 10 мкм.



Рисунок 4.1 – Вид структуры поверхности латунного контакта: а) исходный образец; б), в) КЗ; г) тепловое воздействие при T=1100 °C в течение 30 мин

Поверхности образцов, нагретых в муфельной печи до температур (1100 °C), превышающей температуру плавления латуни (900 – 1000 °C), также имели микродефекты, однако, последние были распределены хаотично, а их форма была неправильной и значительно отличалась от морфологии микрооплавлений, образующихся при КЗ (рисунок 4.1г).

Исследование возможности сохранения обнаруженных признаков протекания дугового процесса при вторичном нагреве (отжиге в ходе развившегося пожара) показало следующее. Нагрев электродугового оплавления латунного контакта вызывает интенсивное окисление латуни, образование на поверхности оксида цинка, который имеет плохую адгезию с основным металлом и легко отслаивается от него. Соответственно, шарообразные частицы, образовавшиеся при КЗ, отслаиваются вместе с оксидной пленкой. Нагрев при 700 °C в течение 40 мин вызвал незначительное окисление поверхности детали, что не повлияло на присутствие шарообразных частиц. Дальнейшее повышение температуры, вплоть до температуры плавления латуни (~ 950 °C), значительно интенсифицировало процесс окисления и, в конечном счете, полностью уничтожило следы протекания КЗ.

4.2 Элементный анализ массопереноса при КЗ латунных контактов

При исследовании электродугового оплавления латунных контактов (КЗ между парой латунь-латунь) при помощи СЭМ с использованием метода отраженных электронов, позволяющего визуализировать составляющие образца по среднему атомному номеру, была обнаружена неоднородность поверхности по химическому составу. Наблюдались три различных области, отличающиеся от среднего элементного состава контакта (рисунок 4.2a, таблица 4.1): область 1 – светлая область, обогащенная медью и обедненная кислородом; область 2 - область, обогащенная цинком и кислородом; область 3 – область поверхностно оплавленных участков, обогащенных медью.



- Рисунок 4.2 Поверхность латунного контакта после электродугового взаимодействия с медным проводником:
- а), б) Изображение в отраженных электронах (BSE-контраст),
- 1 области, обогащенные медью и обедненные кислородом;
- 2 области, обогащенные цинком и кислородом;
- 3 оплавленные участки.
- в) Отдельно расположенные капли CuO (SE- контраст),
- г) Крупная капля CuO (SE- контраст)

Зона анализа	Химический состав, % масс.				
	Cu	Zn	Ο	С	
Средний состав	35	42	16	8	
Область 1	44	41	11	4	
Область 2	17	57	19	7	
Область 3	45	38	12	6	

Таблица 4.1 – Химический состав поверхностного слоя латунного контакта, подвергшегося электродуговому взаимодействию с латунным контактом

На рис. 26 при увеличении 500^х показаны вариации химического состава в отраженных электронах на поверхности латунного контакта. На поверхности оплавленных участков (область 3) присутствовали шарообразные капли крупного размера, химический состав которых был близок к составу оксида меди (II) с примесью цинка. Видны множественные микрооплавления в виде таких капель оксида меди (II), а также их распределение по поверхности области 3 (рисунок 4.2в). Отдельные капли правильной шарообразной формы достигали размеров в 10 мкм (рисунок 4.2г).

Можно заключить, что в процессе протекания дуги КЗ происходят локальные перераспределения цинка и меди в зоне, прилегающей к месту оплавления. При этом, образующиеся на поверхности шарообразные частицы имеют химический состав, близкий к оксиду меди (II) с примесями цинка.

При анализе элементного состава следов дугового взаимодействия латунного контакта и проводников тока, выполненных из меди и алюминия, а также стальной деталью отмечалось насыщение поверхностного слоя алюминиевого проводника медью и цинком, при этом их концентрация, по мере удаления от зоны оплавления, убывала не равномерно.

На расстоянии более 5 мм от оплавления медь и цинк уже не детектировались (рисунок 4.3, таблица 4.2). Аналогичная картина наблюдалась и при электродуговом контакте латунного изделия со стальной деталью и медным проводником.

Зона анализа	Химический состав, % мас				acc.
	Al	Cu	Zn	0	С
Вблизи	19	8	34	15	23
оплавления					
На расстоянии 5 мм	79	< 0,5	< 0,5	5	15
от оплавления					

Таблица 4.2 – Химический состав поверхностного слоя алюминиевого проводника, подвергшегося дуговому взаимодействию с латунным контактом

Элементный микроанализ методом СЭМ оплавлений латунных контактов, запрессованных в металлографические шлифы, показал, что лишь на отдельных участках, размер которых составлял микроны, диагностировались посторонние элементы (алюминий, железо).

Таким образом, при определении металла, с которым произошло взаимодействие латунного изделия, наиболее информативным является анализ поверхности, прилегающей к месту оплавления. Вероятность диагностирования посторонних элементов во внутреннем объеме оплавления достаточно мала [32, 44].



Рисунок 4.3 – Наблюдение случайных вариаций массопереноса цинка и меди на поверхности алюминиевого проводника после КЗ с латунным контактом (ЭМ, BSE-контраст)

4.3 Определение концентрации цинка после КЗ латунных контактов

При исследовании оплавленных латунных контактов проводился их количественный элементный анализ.

Известно, что помимо роста зерна, в латунях при повышении температуры происходят химические реакции взаимодействия цинка с газами атмосферной среды и водяными парами. Цинк имеет большее сродство к кислороду, чем медь, вследствие чего при повышенной температуре в богатой кислородом атмосфере цинк быстрее переходит в оксидную форму и накапливается в оксидной корке на поверхности материала. Оставшийся объем металла, соответственно, обогащается медью. Богатые цинком латуни (более 20 % цинка) окисляются, образуя на поверхности оксид цинка (ZnO). Цинк обладает большим сродством к кислороду и окисляется водяным паром по реакции [9, 20]:

$$Zn + H_2 0 \rightarrow H_2 + Zn0 \tag{4.1}$$

В литературе [57] отмечаются отрицательные факторы, которые сопутствуют электродуговой сварке латуней. Одним из таких факторов является интенсивное испарение цинка из зоны сварного шва. При этом в ходе протекания сварочного процесса может испаряться до 25 % содержащегося в латуни цинка.

Короткое замыкание по своей физической природе идентично процессу электродуговой сварки. Отличие между ними заключается лишь в длительности протекания – аварийный процесс КЗ электрических проводников кратковременен. На этом основании было высказано предположение о том, что процесс короткого замыкания также должен вызывать частичное испарение цинка из латуни, а точнее из зоны, в которой произошло КЗ. Количество испаренного цинка, повидимому, должно зависеть от мощности дугового процесса, длительности его протекания, а также от содержания самого цинка в латуни (в богатых цинком латунях его испарение происходит интенсивнее).

Исследовались следующие пары металлов, подвергшихся воздействию КЗ: латунь-латунь, латунь-медь (марка меди М1), латунь-алюминий (марка алюминия

АДО), латунь-сталь (марка стали Ст3). В ходе элементного анализа проводилось измерение концентрации на оплавленном участке латунного контакта и на расстоянии 5 мм и более от него (таблица 4.3) методами РФА и элементного микроанализа СЭМ.

Таблица 4.3 – Концентрация цинка в зоне оплавления и на удалении от этой зоны в латунном контакте, подвергшемся воздействию КЗ при взаимодействии с различными металлами

Образец	Концентрация Zn, % масс.		
	оплавление	5 мм от	
		оплавления	
латунь-латунь	35,1	36,6	
латунь-медь	34,2	36,4	
латунь-алюминий	34,7	36,2	
латунь-сталь	34,1	36,4	

Во всех исследованных образцах было обнаружено уменьшение концентрации цинка на 1,5 – 2 % масс. в оплавленной части латунного контакта. При этом, изменения концентрации цинка в латунных контактов, оплавленных в муфельной печи при температуре 1100 °C, не наблюдалось. Таким образом, подтвердилось предположение о снижении концентрации цинка в зоне, подвергшейся воздействию электродугового процесса КЗ, что вполне согласуется с физико-химическими закономерностями окисления медно-цинкового сплава [9, 20].

Дальнейший отжиг латунной детали, вплоть до температуры плавления латуни, не влиял на содержание цинка – концентрация в зоне оплавления оставалась пониженной. Нагрев латуни выше температуры плавления приводил к уничтожению исходного оплавления и, соответственно, к утрате дифференцирующего признака.

В таблице 4.4 систематизированы диагностические признаки разрушения латунной детали в результате КЗ и внешнего теплового воздействия, которые были выявлены методами СЭМ и РФА.

Таблица 4.4 – Диагностические признаки механизмов разрушения латунного контакта при пожаре, выявляемые методами СЭМ и РФА

Признаки	Метод	Условия воздействия	
	анализа	КЗ	Внешнее
			тепло
			пожара
Микрооплавления, наблюдаемые	СЭМ	+	-
при увеличениях более 2000 ^х			
Уменьшение концентрации цинка	СЭМ,	+	-
в зоне оплавления на 1,5 – 2,0 %	РФА		
масс.			
Обогащение зоны, прилегающей к	СЭМ,	+	-
месту оплавления,	РФА		
«посторонними» элементами			

Примечание к таблице 4.4: «+» - признак присутствует; «-» - признак не наблюдается.

4.4 Признаки КЗ и внешнего теплового воздействия при металлографическом анализе

Электродуговые оплавления латунных изделий

В результате протекания ПКЗ и ВКЗ в однофазной латуни в месте оплавления образовывалась литая структура быстрой кристаллизации. При этом, если отсутствовало дальнейшее тепловое воздействие, то участок разрушения латунного изделия состоял из нескольких зон. На рисунке 4.4 показан панорамный снимок, на котором хорошо видно распределение таких зон. В левой части фотоснимка расположено оплавление, т.е. участок металла, подвергшийся плавлению и имеющий структуру быстрой кристаллизации. В центральной части снимка находится т.н. зона теплового влияния (ЗТВ). Эта зона характерна тем, что она подвергалась температурам нагрева чуть ниже температуры плавления латуни. Между оплавлением и не оплавленной частью металла наблюдается четкая граница.

Можно утверждать, что наличие структур быстрой кристаллизации – дендритов, ячеек, столбчатых зерен (рисунок 4.5), является характерным

кристаллизации, образующимися при КЗ.



оплавление 3ТВ основной металл Рисунок 4.4 - Микроструктура латунного контакта, образовавшегося в результате КЗ



Рисунок 4.5 - Различные виды микроструктур оплавлений изделий из α-латуни: а) Дендритно-ячеистая и столбчатая структуры; б) Дендритно-ячеистая структура

признаком протекания дугового процесса между латунными деталями. Как показали многочисленные эксперименты, подобные структуры образуются также и при контакте латуни с проводниками тока из меди и алюминия. При этом, данные структуры формируются как в условиях первичного, так и в условиях вторичного КЗ.

Для количественной оценки составляющих (ячеек, дендритов, вытянутых столбчатых зерен) был рассчитан их усредненный поперечный размер *D* по формуле:

$$D = \frac{D_1 + D_2 + \dots + D_n}{n},$$
 (4.2)

где D_1 , D_2 , ..., D_n – поперечные размеры структурных составляющих, выраженные в мкм, n – число измерений поперечных размеров структурных составляющих. На рисунке 4.6а показана схема, иллюстрирующая способ измерения поперечного размера D структурных составляющих.



Рисунок 4.6 - Измерения поперечного размера зерен различной формы: a) Схематическое изображение структурных составляющих и способ их измерения; б) Определение размеров структурных составляющих на реальной микроструктуре (500^x)

Прямые отрезки проводились для различных форм зерен по-разному:

для столбчатых структур – на любом участке зерна;

для дендритных и ячеистых структур – посередине относительно продольной оси.

На примере микроструктуры (рисунок 4.66) показано, как проводилось измерение зерен в поперечнике. Проведенные исследования показали, что в оплавлениях, вызванных электродуговым процессом КЗ (первичного и вторичного), величина данного параметра находится в пределах 5 – 10 мкм (таблица 4.5).

N⁰	Признаки	Условия вторичного теплового		Электри-	Внешнее
п/п		воздействия		ческая	тепло
		Температура	Скорость	дуга	пожара
		нагрева	охлаждения	(ПКЗ и ВКЗ)	
1	Наличие структур быстрой	Т _{комн.} < T < Т _{рекр.}	любая	(+)	$\overline{\bigcirc}$
	кристаллизации в зоне оплавления	T _{рекр.} < T < T _{пл.}	любая	$\overline{}$	\bigcirc
	(дендриты,	T > T	«медленная»	-	$\overline{\bigcirc}$
	ячеики, столочатые зерна)	1 < 1 _{пл.}	«быстрая»	+	+
2	Различие в размере зерна в 1 балл в зоне оплавления и в основном металле	$T_{pekp.} < T < T_{nn.}$	любая	(+)	Θ
3	Граница между оплавлением и основным металлом	$T_{\rm komh.} < T < T_{\rm ill.}$	любая	+	\bigcirc
4	Поперечный размер структурных составляющих в зоне оплавления, мкм	T > Т _{пл.}	«быстрая»	5 - 10	10 - 30
5	Наличие равноосных зерен в зоне оплавления	T > Т _{пл.}	«медленная»	$\overline{\bigcirc}$	+

Таблица 4.5 – Диагностические признаки механизма разрушения латунного изделия при пожаре, выявляемые металлографическим методом^{*}

Примечание к таблице 4.5:

T_{комн.} – температура комнатная; Т_{рекр.} – температура рекристаллизации латуни; Т_{пл.} – температура плавления латуни, зависящая от компонентного состава

Вторичный нагрев электродуговых оплавлений латунных изделий

Подобный нагрев возможен в ходе развившегося пожара. Известно, что рекристаллизационные процессы в латунях начинают протекать при температурах 400 – 500 °C, в зависимости от компонентного состава. Вследствие этого нагрев латунной детали должен приводить к видоизменению микроструктуры оплавления, ЗТВ и основного металла.

Эксперименты показали, что в результате отжига свыше 450 – 550 °C структуры быстрой кристаллизации (дендритная, ячеистая, столбчатая) действительно исчезали и переходили в структуру отожженной α-латуни (рисунок 4.7). Дифференцирующие признаки КЗ в виде структур быстрой кристаллизации, таким образом, нивелировались.



Рисунок 4.7 - Микроструктура латунного контакта, подвергшегося протеканию КЗ и отжигу при температуре 500 °С в течение 40 мин. Полиэдрические зерна α-фазы с двойниками отжига внутри: а) Оплавление; б) Основной металл и ЗТВ,

Однако, как было замечено, в результате нагрева в диапазоне температур от 500 до 900 °C размер зерна на участке оплавления оставался значительно меньше, чем размер зерна на участке основного металла (размер зерна латуней вычислялся в соответствии с ГОСТ 21073-75). В месте оплавления также наблюдалось дуплексное строение зерен, т.е. сочетание зерен малого и крупного размеров. При нагреве ЗТВ исчезает, и за счет разницы в размере зерна между оплавлением и основным металлом сохраняется визуально наблюдаемая граница (рисунок 4.8).



Рисунок 4.8 - Микроструктура оплавления латунного контакта на границе с основным металлом. Отжиг при температуре 500 °C в течение 40 мин

Таким образом, 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 1 размер зерна между участком оплавления и участком основного металла.

Как показали исследования, подобная картина наблюдается вплоть до температур порядка 900 °С. После нагрева латунного изделия свыше 900 – 1070 °С происходит плавление латуни и указанные дифференцирующие признаки исчезают полностью. Выявить следы протекания КЗ в этой ситуации металлографическим методом уже не представляется возможным.

Оплавления латунных изделий, вызванные внешним тепловым воздействием

Очевидно, что оплавления латунных изделий могут также сформироваться и под воздействием тепла пожара при превышении температуры плавления латуни. В ходе этого процесса решающее влияние на конечный вид микроструктуры латуни оказывает скорость охлаждения расплавленного металла. Газовый состав атмосферы в данном случае не должен оказывать воздействия на форму зерен [15, 57].

При медленном охлаждении расплавленной α-латуни образовывались крупные равноосные зерна α-фазы (рисунок 4.9а). В микроструктуре оплавления наблюдались поры.

В случае быстрого охлаждения оплавления в воде в α -латуни образовывались структуры, вид которых схож со структурами быстрой кристаллизации при КЗ - дендриты, ячейки и столбчатые зерна (рисунок 4.9б). Тем не менее, установлено, что существует диагностический параметр, позволяющий дифференцировать 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 мкм (при КЗ D = 5 – 10 мкм).



Рисунок 4.9 - Микроструктуры оплавлений латунных контактов, образовавшихся в результате их нагрева выше температуры плавления T=1000 °C. Различные скорости охлаждения: а) Медленное охлаждение (в печи). Равноосные зерна αфазы; б) Быстрое охлаждение (в воде). Ячеисто-столбчатая структура α-фазы

В таблице 1 в обобщенном виде приведены установленные в данной работе диагностические признаки электродугового процесса в латунном изделии и расплавления в результате внешнего теплового воздействия на него при пожаре [33].

Взаимодействие латунного изделия и алюминиевого проводника

Известно, что легирование латуни, имеющей α-структуру, каким-либо элементом, например, алюминием, может приводить к образованию в латуни βфазы [15]. В ходе пожара возможно электродуговое и химическое взаимодействие при контакте латунного изделия с проводником тока из алюминия. Экспериментальное исследование данных ситуаций показало следующее.

При электродуговом взаимодействии объекта, выполненного из латуни, имеющую α-структуру, с алюминием, образовывалась β-фаза. Так, например, на микроструктуры оплавлений, образовавшиеся рисунке 4.10a показаны В электродугового взаимодействия латунным результате между контактом, выполненном из латуни марки Л63 и алюминиевым проводником. Латунь Л63, имевшая в исходном состоянии однофазную α-структуру, при контакте с алюминием изменила фазовый состав и перешла в (α+β)-латунь.

При контактном взаимодействии латуни с алюминием в случае нагрева до температур, свыше 500 °C на поверхности латунного изделия в зоне его соприкосновения с алюминием происходило локальное разрушение медно-Предположительно, цинкового сплава. данное явление связано С интенсификацией процесса окисления латуни и образования на поверхности хрупкого и легко отслаивающегося оксида ZnO, который, выкрашиваясь, создает локальное углубление в латунном изделии. Металлографический анализ участка разрушения латуни показал, что в исходной структуре α-латуни произошло изменение фазового состава – на отдельных участках появилась β-фаз (рисунок 4.10б).

В обоих рассмотренных случаях наличие β-фазы в структуре α-латуни затрудняло дифференцирование КЗ и внешнего теплового воздействия, т.к. (α+β)латунь имела дендритно-ячеистое строение, схожее со структурами быстрой



Рисунок 4.10 - Микроструктуры оплавлений латуни Л63, образовавшихся в результате контакта с алюминиевым проводником: а) КЗ. Вся площадь снимка занята (α+β)-структурой; б) Контакт при температуре 600 °C в течение 40 мин. (α+β)-структура, частично занимающая площадь локально разрушенного участка латуни
Основные выводы по главе 4

В ходе проведения экспериментов по моделированию пожароопасного аварийного электрического режима в различных условиях и исследования визуальным и инструментальными методами оплавлений латунных токоведущих изделий, а также при их контакте с другими металлами, были получены следующие результаты:

- Определены диагностические критерии, позволяющие дифференцировать следы КЗ, возникающего при контакте латунных изделий с другими металлами, и следы внешнего теплового воздействия.
- 2 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.
- 3 Внешнее тепловое воздействие пожара, нагрев свыше температуры плавления латуни и быстрое охлаждение водой формируют структуры быстрой кристаллизации, схожие со структурами, образующимися при КЗ. В данном случае диагностическим параметром, позволяющим отличить КЗ от внешнего теплового воздействия, является усредненный поперечный размер структурных составляющих D.
- 4 При контакте с алюминиевым проводником в микроструктуре однофазной αлатуни может дополнительно образовываться β-фаза, что затрудняет диагностику причины разрушения латунного изделия металлографическим методом.
- 5 Выявлены диагностические критерии, позволяющие определить причину разрушения при пожаре латунных контактов электродуговой процесс или внешнее тепловое воздействие.
- 6 На поверхности латунных контактов в зоне, прилегающей к месту оплавления, вызванного электрической дугой КЗ, при увеличениях более 2000^х,

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 °C. Дальнейший нагрев вызывал их уничтожение.

- 7 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.
- 8 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.

5 ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЛАВЛЕНИЙ МЕДНЫХ ПРОВОДНИКОВ И ЛАТУННЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ЭКСПЕРТИЗЕ ПОЖАРОВ

Результаты диссертационной работы, приведенные выше в главах 3, 4, позволяют внести определенные коррективы в применяемые на практике экспертного исследования пожара оплалвений методики после медных проводников, повысить обоснованность достоверность формулируемых И экспертных выводов.

Ниже приведена усовершенствованная аналитическая схема и рекомендуемая трактовка полученных с их помощью результатов [42].

5.1 Схема экспертного исследования оплавлений медных проводников

На рисунке 5.1 приведена общая схема экспертного исследования после пожара медных кабельно-проводниковых изделий с оплавлениями. Ниже описаны основные ее этапы.

1 этап. Визуальное исследование

На стадии визуального исследования необходимо определить природу оплавления, т.е. образовалось ли оно в результате протекания сверхтока или в результате внешнего теплового воздействия.

В случае выявления на медном проводнике только признаков механического повреждения или оплавлений, имеющих явные признаки формирования в результате внешнего теплового воздействия, делается вывод о том, что на данных проводниках признаков протекания пожароопасных аварийных режимов работы электросети не обнаружено. Дальнейшее исследование таких проводников инструментальными методами не проводится.

При обнаружении повреждений в виде оплавлений, расположенных по длине проводника и характерных для теплового воздействия сверхтока, дальнейший их анализ может не проводиться. Исследование завершается выводом о выявлении признаков токовой перегрузки на исследуемом фрагменте проводника.



Примечание:



Рисунок 5.1 – Схема экспертного исследования после пожара оплавлений медных проводников

При обнаружении повреждений в виде оплавлений, расположенных на конце проводника и характерных для теплового воздействия сверхтока (в т.ч. электродугового воздействия), необходимо продолжить исследование инструментальными методами - СЭМ, РСА и металлографического анализа.

При подозрении о растворении медного проводника при контакте с легкоплавким металлом следует провести анализ элементного состава оплавленной зоны (при наличии соответствующего оборудования), а также металлографический анализ.

2 этап. Элементный анализ

Анализ элементного состава оплавления проводится, в частности, для выявления взаимодействия медного проводника с легкоплавким металлом. При обнаружении в оплавленной зоне следов легкоплавких металлов, следует учитывать возможность возникновения оплавления не только в результате воздействия сверхтока, но и вследствие растворения меди при контакте с легкоплавким металлом. Для подтверждения данной версии необходимо проведение металлографического анализа.

3 этап. Сканирующая электронная микроскопия

Исследование методом СЭМ применяется для определения природы оплавлений, а также для установления условий формирования оплавлений, вызванных дугой КЗ. Данное исследование проводится при наличии соответствующего оборудования.

4 этап. Рентгеноструктурный анализ

Исследование методом РСА проводится для определения условий формирования оплавления, образовавшегося в результате протекания аварийного режима КЗ (дифференциация ПКЗ-ВКЗ). Однако, данному исследованию подвергают все оплавления, вызванные тепловым воздействием сверхтока, а также оплавления неизвестной природы.

В случае, если при дальнейшем проведении металлографического исследования будет установлено, что оплавление образовалось в результате протекания аварийного режима токовой перегрузки или, в общем случае,

113

воздействия сверхтока, а также внешнего теплового воздействия, то результат РСА не используется для определения условий формирования оплавления.

В случае, если при металлографическом исследовании оплавления будут выявлены признаки его формирования вследствие КЗ, то результат проведения рентгеноструктурного анализа интерпретируется по одному из трех возможных вариантов:

0 < k < 0,5 – обнаружены признаки формирования оплавления в условия пожара (ВКЗ);

 $0,5 \le k \le 2$ – определить условия формирования оплавления методом PCA не представляет возможным (НПВ);

k > 2 - обнаружены признаки формирования оплавления в условия «до пожара» (ПКЗ).

5 этап. Металлографический анализ

В рамках металлографического исследования решаются следующие экспертные задачи:

- определение причины, вызвавшей оплавление токоведущей жилы (аварийный режим работы электросети, внешнее тепловое воздействие или растворение меди при контакте с легкоплавким металлом);

- определение вида аварийного режима работы электросети, приведшего к образованию оплавления токоведущей жилы (КЗ или токовая перегрузка).

Металлографическому исследованию подвергаются все оплавления, образовавшееся по визуальным (морфологическим) признакам в результате теплового воздействия сверхтока, а также оплавления, природу которых, по каким-либо причинам, затруднительно определить на стадии визуального и морфологического исследования.

В случае выявления признаков протекания КЗ необходимо определить условия, при которых сформировалось данное оплавление (ПКЗ или ВКЗ), в соответствии с рекомендациями, приведенными на этапе 4.

В случае, если оплавление имеет признаки протекания токовой перегрузки или невозможно уточнить вид аварийного режима работы электросети,

приведшего к образованию оплавления, определение условий, при которых оно сформировалось не производится, поэтому результаты ранее проведенного рентгеноструктурного анализа не учитываются. По окончании исследований делается вывод об обнаружении признаков воздействия на проводник сверхтока и образовании оплавления в результате этого процесса без уточнения условий его протекания.

При отсутствии признаков протекания сверхтока следует сделать вывод о том, что следов протекания аварийных пожароопасных режимов работы электросети (КЗ и токовая перегрузка) не обнаружено.

Пример использования методики

Апробация предлагаемой схемы при исследовании вещественных доказательств, изъятых с мест пожаров, показала ее работоспособность.

В качестве примера можно привести пожар, произошедший в автомобиле Фиат Дукато, который был оставлен владельцем на ночь на стоянке. После ряда заинтересованных сторон (страховщик) проведенных экспертиз одна ИЗ утверждала, что на момент возникновения горения автомобиль был обесточен, поскольку была снята минусовая клемма с аккумуляторной батареи. Экспертиза по данному пожару была назначена в Исследовательский центр экспертизы пожаров СПбУ ГПС МЧС России. В рамках данной экспертизы были представлены изъятые ИЗ сгоревшего автомобиля фрагменты медных проводников, являвшихся частью его бортовой электросети. В ходе визуального исследования проводников на их поверхности были обнаружены шарообразные частицы меди – т.н. вздутия (рисунок 5.2), которые, как было описано в главе 2, являются следами воздействия на проводник сверхтоков.



Рисунок 5.2 – Шаровидное образование (вздутие) на поверхности медного проводника, свидетельствующее о протекании по проводнику сверхтока

Металлографический анализ оплавленных участков проводника показал наличие поверхностных и межпроволочных оплавлений, также являющихся следствием протекания по медному проводнику сверхтоков (рисунок 5.3).



Рисунок 5.3 – Поверхностные и межпроволочные оплавления, являющиеся следствием протекания по медному проводнику сверхтоков

116

Таким образом, в результате проведённого исследования было установлено то, что электросеть автомобиля на момент пожара находилась под напряжением. Эта криминалистически значимая информация позволила сделать объективный и обоснованный вывод о причине пожара.

В таблице 5.1 систематизированы признаки, характерные для оплавлений медных проводников различной природы, а также методы их обнаружения.

Метод исследования	Зона исслелования	Признак	Причина оплавления проводника		
	и кратность увеличения		Воздей сверх		Внешнее тепловое
			КЗ	Перегруз ка (> 3÷4 крат)	воздействи е
Визуальный	Изоляция (если сохранилась), < 10 ^x	Термическое повреждение	Со стороны проводника на локальном участке в зоне оплавления	Со стороны проводника на протяженно м участке	С внешней стороны
	Оплавление, < 10 ^x	Форма (шарообразная, косой срез, поперечный срез, вырыв)	+	+	_
		Локальность	+	±	_
		Локальное сплавление 2-х проводников	±	_	±
		Рядом расположенные 2 и более оплавлений	±	-	±
	Проводник по всей длине фрагмента, < 10 ^x	Поверхностное оплавление	±	±	-
		Вздутие (-я)	±	±	_
		Утолщение (-я)	±	±	_
		Шейка (-и)	±	±	_

Таблица 5.1 – Признаки, характерные для оплавлений медных проводников различной природы, и методы их обнаружения

Метод исследования	Зона исследования и кратность увеличения	Признак	с Причина оплавления проводи		
			Воздействие сверхтока		Внешнее тепловое
			КЗ	Перегруз ка (> 3÷4 крат)	воздействи е
		Фрагментация	±	±	_
СЭМ	Вся поверхность оплавления, 500 ÷ 2000 ^x	Кратеры, лунки	+	_	_
Металлограф ический анализ	Участок проводника рядом с оплавлением и (или) удаленный от него, 50 ÷ 100 ^x	Поверхностное оплавление	_	+	_
		Оплавление границ зерен	-	±	_
		Межпроволоч ное оплавление (для многопроволочн ых проводников)	_	±	_
	Оплавление и прилегающий к нему участок проводника, 50 ^x	Граница между проводником и оплавлением	Прямая	Вытянутая вдоль оси проводника, размытая или отсутствует	Размытая или отсутствует
	Оплавление, 100 ÷ 200 ^x	Концентрация кислорода, %	≥ 0,05	≥ 0,05	0,05
		Форма зерна	Столбчатая, вытянутая, дендритная	Дендритная	Равноосная
		Пористость	Микропоры присутствую т или отсутствуют	Единичная макропора на фоне микропор	Микропоры присутствуют или отсутствуют

Примечание к таблице 5.1:

«+» - признак обязательно присутствует;

«±» - признак может, как присутствовать, так и отсутствовать;

«-» - признак обязательно отсутствует.

5.2 Схема экспертного исследования электротехнических изделий из латуни

Общая схема экспертного исследования, предлагаемая исходя из результатов диссертационной работы, приведена на рисунке 5.4. В таблице 5.2 приведены признаки, выявляемые на каждом из этапов исследования.

На начальном этапе, по результатам визуального осмотра для инструментального исследования отбирают изделия, выполненные предположительно, из латуни.

При визуальном осмотре латунного изделия:

- На поверхности латунного изделия, выявляется разрушение, характерное для протекания процесса *БПС*. В этом случае исследование заканчивают на данном этапе, и дальнейшее исследование производится в соответствии с методическими рекомендациями [9];

- Если выявлено разрушение латунного изделия, природа которого характерна либо для протекания электродугового процесса КЗ, либо для внешнего теплового воздействия, либо для химического взаимодействия, то в этих случаях образцы подвергают следующем исследования на этапе рентгенофлюоресцентному анализу;

- При обнаружении признаков разрушения латунного изделия в результате *окалинообразования*, либо при полном отсутствии какого-либо рода разрушений, исследование по настоящей методике завершается и делается вывод о том, что признаков протекания пожароопасных аварийных процессов не обнаружено, либо уточняется причина разрушения латунного изделия.



Рисунок 5.4 – Схема экспертного исследования оплавлений латунных изделий

Таблица 5.2 – Признаки разрушения латунного изделия, выявляемые на каждом из этапов исследования

Метод	КЗ	Внешнее	Окалино-	Химическое
исследования		тепловое	образование	взаимодейст
		воздействие		вие
Визуальный	Локальность	Протяженная зона	- Наличие окалины	Наличие металла
OCMOTD	оплавления	оплавления	на поверхности	серого цвета в
ocmorp			изделия;	зоне разрушения
			- Под слоем	
			окалины	
			видоизмененная	
			поверхность	
РФА	а) В спектре			Присутствие в
	оплавления			спектре
	присутствуют Fe,	—	—	оплавления Рb и
	Al;			Sn, при этом в
	б) Элементный			спектре
	состав			исходного
	оплавления			латунного
	идентичен			изделия этих
	основному			элементов нет
	металлу.			
Металлографи	а) Структура	а) Структура		 Наличие (α+β) -
a	быстрой	быстрой		структуры
Я	кристаллизации в	кристаллизации в		
	месте	месте оплавления;		
	оплавления;	б) Зерна равноосные	—	
	б) Зерна	и одинаковые по		
	равноосные, но	размеру в месте		
	различные по	оплавления и в зоне		
	размеру в месте	основного металла.		

Метод	КЗ	Внешнее	Окалино-	Химическое
исследования		тепловое	образование	взаимодейст
		воздействие		вие
	оплавления и в зоне основного металла. Между оплавлением и основным металлом имеется граница; в) Возможно наличие (α+β) – фазы при взаимодействии с	в) D = 25 ÷ 30 мкм.		
	алюминием; г) $D = 5 \div 10$ мкм.			

Примечание к таблице 5.2:

"—" – отсутствие признаков, характерных для данной причины разрушения латунного изделия на соответствующем этапе исследования

При проведении РФА:

- Обнаружение в зоне оплавления элементов, не содержащихся в основном металле, например алюминия или железа, указывает на взаимодействие латунного изделия с тем или иным металлом. Оплавление подвергается металлографическому анализу на третьем этапе исследования;

- Присутствие в спектре оплавления тех же элементов, что и в основном металле, свидетельствует либо электродуговом взаимодействии между латунными изделиями, либо о взаимодействии латунного изделия с медным проводником. Оплавление подвергается металлографическому анализу на третьем этапе исследования;

- Наличие в спектре разрушенного участка латунного изделия олова и свинца указывает на химическое взаимодействие легкоплавкого припоя с латунным образцом. При этом исследование по настоящей методике завершается и делается вывод о том, что признаков протекания пожароопасных аварийных процессов не обнаружено, либо уточняется причина разрушения латунного изделия.

При проведении металлографического анализа:

- В случае, если анализ микроструктуры образца показывает наличие признаков протекания электродугового процесса, делается вывод о том, что обнаруженное оплавление имеет признаки, характерные для короткого замыкания. Кроме того, если на стадии элементного анализа в месте оплавления был обнаружен внесенный элемент, то нужно указать с каким металлом произошло взаимодействие.

- Появление β-фазы с структуре α-латуни затрудняет дифференциацию короткого замыкания и внешнего теплового воздействия. В данном случае выявить признаки КЗ не представляется возможным. В выводах также необходимо указать металл, с которым произошло взаимодействие латунного изделия, если таковой был обнаружен на стадии элементного анализа.

- При наличии в структуре латунного образца признаков внешнего теплового воздействия делается вывод о том, что следов протекания аварийных пожароопасных режимов работы электросети либо не обнаружено, либо их выявление затруднительно.

- В случае наличия оплавлений медных проводников исследование проводится в соответствии с методическими рекомендациями [1].

Примеры использования методики

1 В качестве одного из примеров работы по предлагаемой схеме исследования после пожара латунных токоведущих изделий можно привести пожар, произошедший в жилом многоквартирном доме в г. Санкт-Петербурге. Огнем была уничтожена меблировка комнаты и другие сгораемые материалы. В очаговой зоне, на полу, были обнаружены остатки тройника – фрагменты латунных контактных пластин, одна из которых была оплавлена на конце (рисунок 5.3).



Рисунок 5.3 – Фрагмент латунной контактной пластины тройника. Отмечена оплавленная зона

При анализе металлографического шлифа оплавленного участка латунной детали на оптическом микроскопе при увеличении 1000 крат было обнаружено столбчатое и дендритное строение зерен (рисунок 5.4). В соответствии с предлагаемыми методическими принципами данный признак указывает на дуговую природу оплавления латунной детали.



Рисунок 5.4 – Микроструктура оплавленного участка латунной контактной пластины, 1000^x

В дополнение к этому результату, при проведении количественного элементного анализа было обнаружено, что концентрация цинка на оплавленном участке отличается от неоплавленного участка на 1,6 %.

В совокупности эти результаты позволили утверждать об электродуговой природе оплавления латунной контактной пластины.

2 Второй пример анализа оплавленных токоведущих деталей из латуни при экспертизе пожаров приведен ниже. Пожар произошел в загородном доме. В качестве одной из версий причины пожара выступала электротехническая – аварийный режим работы в электросчетчике. С места пожара были изъяты остатки электросчетчика и фрагменты подводящих к нему медных проводников, сплавленных между собой и с латунной деталью (рисунок 5.5). В ходе экспертизы возник вопрос о природе данного сплавления, т.е. образовалось ли оно в результате дугового процесса или внешнего теплового воздействия.



Рисунок 5.5 – Оплавление латунной детали и ее сплавление с медными проводниками, присоединенными к электросчетчику

Для ответа на данный вопрос был проведен металлографический анализ оплавленной зоны латунной детали, который показал, что ее микроструктура представляет собой равноосные зерна α-латуни (рисунок 5.6), которые сформировались в результате нагрева выше температуры плавления латуни и ее медленного охлаждения.



Рисунок 5.6 – Микроструктура оплавления латунной детали, 50^х

Количественный элементный анализ на показал равенство концентрации цинка оплавленном и неоплавленном участках.

В результате проведенных исследований можно утверждать об отсутствии следов электродугового воздействия на данном участке электроцепи и формировании оплавления в результате внешнего теплового воздействия в ходе пожара.

Основные выводы по главе 5

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.

Предложены методические основы по экспертному анализу токоведущих металлоизделий из латуни. Дана схема экспертного исследования электротехнических изделий из латуни после пожара.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения экспериментов по моделированию пожароопасных аварийных электрических режимов и исследования визуальным и инструментальными методами оплавлений медных проводников и латунных токоведущих изделий, были получены следующие результаты:

- 1 Действие тока перегрузки приводит 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.
- 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.е. к фрагментации.
- 5 Количественная оценка следов токовой перегрузки (вздутий, утолщений, шеек и фрагментации) показала их зависимость от кратности тока перегрузки.
- 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, макропора 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.
- 10Внешнее тепловое воздействие пожара, нагрев свыше температуры плавления латуни и быстрое охлаждение водой формируют структуры быстрой кристаллизации, схожие со структурами, образующимися при КЗ. В данном случае диагностическим параметром, позволяющим отличить КЗ от внешнего теплового воздействия, является усредненный поперечный размер структурных составляющих D.
- 11При контакте с алюминиевым проводником в микроструктуре однофазной αлатуни может дополнительно образовываться β-фаза, что затрудняет диагностику причины разрушения латунного изделия металлографическим методом.
- 12Выявлены диагностические критерии, позволяющие определить причину разрушения при пожаре латунных контактов электродуговой процесс или внешнее тепловое воздействие.
- 13На поверхности латунных контактов в зоне, прилегающей к месту оплавления, 2000^x, вызванного электрической дугой КЗ, при увеличениях более шарообразных обнаруживалось наличие множества 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.

- 14При 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.
- 15На 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александров, А.А. Методические рекомендации по исследованию медных проводников в зоне короткого замыкания и термического воздействия для электропроводок автомобилей Волжского завода [Текст] / А.А. Александров. - М.: ВНИИПО. - 1993. -35 с.
- Арцимович, Л.А. Пинч-эффект. Элементарная физика плазмы [Текст] / Л.А. Арцимович. -М.: Атомиздат. - 1969. - 189 с.
- Бахтиаров, А.В. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ [Текст] / А.В. Бахтиаров. -Л.: Недра. - 1985. – 144 с.
- 4. Богомолова, Н.А. Практическая металлография: Учебник для техн. училищ. [Текст] / Н.А. Богомолова. 2-е изд., испр. М.: Высш. школа. 1982. 272 с.
- Боков, Г.В. Выбор источника питания при исследованиях короткого замыкания в электропроводках [Текст] / Г.В. Боков // Сб. Пожарная профилактика в электроустановках. – М.: ВНИИПО. - 1981, С. 128 – 136.
- Вайнгард, У. Введение в физику кристаллизации металлов [Текст] / У. Вайнгард. М.: Мир. - 1967. – 170 с.
- Вашуль, Х. Практическая металлография. Методы изготовления образцов [Текст] / Х. Вашуль. – М.: Металлургия. - 1988. – 320 с.
- Воронов, С.П. Исследование медных проводников с целью установления признаков очага пожара [Текст] / С.П. Воронов, Н.М. Булочников, Ю.И. Черничук, С.В. Москвич // Сборник научных трудов ВНИИПО. - М.: ВНИИПО. - 2004. - С. 227-228.
- Захаров, А.М. Промышленные сплавы цветных металлов. Фазовый состав и структурные составляющие [Текст] / А.М. Захаров. - М.: Металлургия. - 1980. – 256 с., ил.
- ГОСТ Р 52736-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания [Электронный ресурс]. – Введ. 2007-12-07. – Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: http://www.docs.cntd.ru (Дата обращения 15.05.2015)
- ГОСТ 13938.13-93 Медь. Методы определения массовой доли кислорода [Электронный ресурс]. Введ. 1993-21-07. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: http://www.docs.cntd.ru (Дата обращения 17.10.2015)
- ГОСТ 15845 80. Изделия кабельные термины и определения. [Электронный ресурс]. Введ. 1981-07-01. – Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: http://www.docs.cntd.ru (Дата обращения 10.06.2015)
- 13. Граненков, Н.М. Исследование медных проводов в зонах короткого замыкания однопроводной электросети [Текст] / Н.М. Граненков, Г.А. Дюбаров, В.Ф. Трутнев, М.В. Чиликин // Пожаровзрывобезопасность. М.: ВНИИПО.. 1993. Вып. 4. С. 25-27.

- 14. Гришин, Е.В. Вероятностная оценка пожарной опасности электропроводок на лотках и в коробах [Текст] / Е.В. Гришин, А.Ф. Никитина // Сб. Пожарная профилактика в электроустановках. - М.: ВНИИПО. – 1981. - С. 49-61.
- 15. Гуляев, А.П. Металловедение [Текст] / А.П. Гуляев. М.: Металлургия. 1986. 544 с.
- 16. Жолобов, В.В. Металлографический атлас по меди и медным сплавам, обрабатываемым давлением [Текст] / В.В. Жолобов, И.И. Зедин М.: Металлургиздат. 1949. 188 с.
- Забиров, А.С. Пожарная опасность коротких замыканий [Текст] / А.С. Забиров. М.: Стройиздат - 1980. – 137 с.
- 18. Захаров, А.М. Промышленные сплавы цветных металлов. Фазовый состав и структурные составляющие [Текст] / А.М. Захаров. М.: Металлургия 1980. 256 с.
- 19. Интернет-ресурсМЧСРоссии[Электронныйресурс].URL:http://www.mchs.gov.ru/pogarustat.doc. (Дата обращения 10.06.2015)
- Колачев, Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: 2изд. перераб. и доп. [Текст] / Б.А. Колачев, В.А. Ливанов, В.И. Елагин. – М.: Металлургия. -1981. – 416 с.
- Колмаков, А.И. Диагностика причин разрушения металлических проводников, изъятых с мест пожаров: Метод. рекомендации [Текст] / А.И. Колмаков, Б.В. Степанов, С.И. Зернов, Е.Р. Россинская, Н.Г. Соколов. - М.: ЭКЦ МВД РФ. - 1992. – 32 с.
- Колмаков, А.И. Методика приготовления металлографических шлифов металлических объектов, поступающих на экспертизу: Методические рекомендации [Текст] / А.И. Колмаков. - М.: ЭКЦ МВД России. - 1996. - С. ил. табл. библиограф.
- Колмаков, А.И. Методика травления металлографических шлифов металлических объектов, поступающих на экспертизу: Учебное пособие / А.И. Колмаков, В.В. Пеньков. М.: ЭКЦ МВД России. 1999. 45 с.
- 24. Колмаков, А.И. Экспертное исследование металлических изделий (по делам о пожарах): Учебное пособие [Текст] / А.И. Колмаков, Н.М. Граненков, С.И. Зернов, В.В. Пеньков, Н.Г. Соколов, Б.В. Степанов, И.С. Таубкин, И.Д. Чешко. - М.: ЭКЦ МВД России. - 1993. – 104 с.
- 25. Лахтин, Ю.М. Материаловедение [Текст] / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. М.: Машиностроение. 1972. 510 с.
- 26. Маковкин, А.В. Изучение состояния электрооборудования при осмотре места пожара: Учебное пособие [Текст] / А.В. Маковкин, В.Н. Кабанов. – М.: ВНИИПО МВД СССР. -1988 – 48 с.
- 27. Маковкин, А.В. Проведение экспертных исследований по установлению причинноследственных связей аварийных процессов в электросети с возникновением пожара:

Учебное пособие [Текст] / А.В. Маковкин, В.И. Кабанов, В.М. Струков. - М.: ВНИИ МВД СССР. - 1988. - 98 с.

- Мальцев, М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов [Текст] / М.В. Мальцев. М.: Металлургия. 1970. 364 с.
- Митричев, Л.С. Исследование медных и алюминиевых проводников в зонах короткого замыкания и термического воздействия. Методические рекомендации [Текст] / Л.С. Митричев, А.И. Колмаков, Б.В. Степанов, Е.Р. Россинская, Э.В. Вртанесьян, С.И. Зернов. -М.: ВНИИ МВД СССР. – 1986. – 43с.
- 30. Мокряк, А.Ю. Актуальность проблемы экспертного анализа оплавлений медных проводников после пожара [Текст] / А.Ю. Мокряк, С.О. Шульгин, Н.Н. Романов // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). – 2013. – №2. – С. 41–46.
- 31. Мокряк, А.Ю. Влияние отжига на микроструктуру оплавлений медных проводников, вызванных сверхтоком [Текст] / А.Ю. Мокряк, А.В. Мокряк // V Международная научнопрактическая конференция «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы». -Воронеж: ФГБОУ ВПО Воронежский институт ГПС МЧС России. – 2014. – С. 241 – 245.
- 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.
- 33. 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.
- 34. Мокряк, А.Ю. Металлографические и морфологические исследования металлических объектов судебной пожарно-технической экспертизы: учебное пособие [Текст] / 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. – 160с., 117 ил., 16 табл., 52 библиогр.
- 35. Мокряк, А.Ю. Металлографический анализ медных проводников, подвергшихся воздействию токовой перегрузки, при экспертизе пожаров [Текст] / А.Ю. Мокряк, И.Д. Чешко // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России (Научно-практический журнал). 2014. №4. С. 51 58.

- 36. Мокряк, А.Ю. Морфологический анализ медных проводников, подвергшихся воздействию токовой перегрузки, при экспертизе пожаров [Текст] / А.Ю. Мокряк, И.Д. Чешко, В.В. Пеньков // Проблемы управления рисками в техносфере. 2014. № 4 (32). С. 41 49.
- 37. Мокряк, А.Ю. Выявление признаков токовой перегрузки на медных проводниках [Текст] / А.Ю. Мокряк, И.Д. Чешко // V Международная научно-практическая конференция «Теория и практика судебной экспертизы в современных условиях». – М.: МГЮА им. О.Е. Кутафина. - 2015. – С. 125 – 128.
- Мокряк, А.Ю. Металлографический и морфологический атлас объектов, изымаемых с мест пожаров [Текст] / А.Ю. Мокряк, З.И. Тверьянович, И.Д. Чешко, А.Н. Соколова. – М.: ВНИИПО. - 2008. – 184 с.
- 39. Мокряк, А.Ю. Применение компьютерной системы анализа изображения в металлографическом исследовании объектов, изъятых с места пожара [Текст] / А.Ю. Мокряк, И.Д. Чешко // Пожарная безопасность многофункциональных и высотных зданий и сооружений. Материалы XIX науч.-практ. конф., Ч.2. – М.: ВНИИПО. - 2005. – С. 167 – 169.
- 40. Мокряк, А.Ю. Применение сканирующей электронной микроскопии для определения природы оплавлений медных проводников при пожаре [Текст] / И.Д. Чешко, А.Ю. Парийская, А.Ю. Мокряк // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. – № 2. – 2015. – С. 5 – 11.
- 41. Мокряк, А.Ю. Рентгенофазовый анализ медных проводников, подвергшихся воздействию сверхтоков [Текст] / А.Ю. Парийская, И.Д. Чешко, А.Ю. Мокряк // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. № 2. 2016. С. 14 20.
- 42. Мокряк, А.Ю. Усовершенствование методики экспертного исследования после пожара оплавлений медных проводников [Текст] / А.Ю. Мокряк, И.Д. Чешко // VI Международная научно-практическая конференция «Теория и практика судебной экспертизы в современных условиях». – М.: МГЮА им. О.Е. Кутафина. – 2017. – С. 238 – 241.
- 43. Мокряк, А.Ю. Экспертный анализ оплавлений медных проводников, образовавшихся при токовой перегрузке [Текст] / А.Ю. Мокряк, А.В. Мокряк // IV Международная научная конференция «Пожарная безопасность». НовиСад, Сербия: Техническая школа прикладных исследований. 2014. С. 82 92.
- 44. 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.

- 45. Мыльников, М.Т. Общая электротехника и пожарная профилактика в электроустановках: Учебник для пожарно-технических училищ [Текст] / М.Т. Мыльников. – М.: Стройиздат. -1985. - 311 с.
- 46. Новиков, И.И. Дендритная ликвация в сплавах [Текст] / И.И. Новиков, В.С. Золоторевский.
 М.: Наука. 1966. 156 с.
- 47. Осинцев, О.Е. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: справочник [Текст] / О.Е. Осинцев, В.Н. Федоров. М.: Машиностроение. 2004. 336 с.
- 48. Осинцев О.Е. Металловедение и термическая обработка меди и сплавов на ее основе: Учебное пособие [Текст] / О.Е. Осинцев. - М., 1994. – 150 с.
- 49. Панов, А.Г. Исследование микроструктуры методами автоматического анализа изображения ImageExpert Pro 3 и ImageExpert Sample 2: Методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу "Методы исследования материалов и процессов" [Текст] / А.Г. Панов. - Наб. Челны: ИНЭКА. – 2009. - 63 с.
- Б. Пантелеев, В.Г. Компьютерная микроскопия [Текст] / В.Г. Пантелеев, О.В. Егорова, Е.И. Клыкова. М.: Техносфера 2005. 304 с.
- 51. Пехотиков, В.А. Определение причастности к пожару электропроводок в стальных оболочках [Текст] / В.А. Пехотиков, В.В. Янишевский, А.В. Богданов, Г.А. Дюбаров // Пожарная профилактика в электроустановках. М.: ВНИИПО. 1985. С. 65-73.
- 52. Покатаев, Е.П. Сварка разнородных металлов и сплавов: Учеб. пособие [Текст] / Е.П. Покатаев. Волгоград: ВолгГТУ. 2002. 128 с.
- 53. Правила устройства электроустановок: 7-е изд. [Текст]. СПб.: изд. ДЕАН. 2008. 1168 с.
- 54. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда. 2-е изд. [Текст] / Ю.П. Райзер. М.: Наука. 1992. 536 с.
- 55. Рид, С.Дж.Б. Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия [Текст] / С.Дж.Б. Рид. М.: Техносфера. 2008. 232 с.
- 56. Россинская, Е.Р. Влияние нагрева электрическим током и внешнего нагрева на структуру алюминиевого провода [Текст] / Е.Р. Россинская, Б.В. Степанов, В.С. Сандлер, Т.И. Никольская // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1990. – Вып. 8. - С. 61-63.
- 57. Рыбаков, В.М. Дуговая и газовая сварка [Текст] / В.М. Рыбаков. М.: Высш. школа. 1989.
 256 с.
- 58. Рюденберг, Р. Эксплуатационные режимы электроэнергетических систем и установок [Текст] / Р. Рюденберг. – Л.: Энергия. Ленингр. отделение. - 1980. – 578 с.
- Семенченко, В.К. Поверхностные явления в металлах и сплавах [Текст] / В.К. Семенченко.-М.: Гостехиздат. - 1957. - 491 с.

- Смелков, Г.И. Анализ статистических данных о пожарной опасности электрических изделий [Текст] / Г.И. Смелков, А.И. Рябиков // Энергобезопасность и энергосбережение. М.: 2009. № 1.
- 61. Смелков, Г.И. Вероятность возникновения пожара в прокладках кабелей и проводов электрических сетей [Текст] / Г.И. Смелков, Г.В. Боков // Пожарная профилактика в электроустановках: Сб. науч. тр. - М.: ВНИИПО. – 1991. - с. 46-53.
- 62. Смелков, Г.И. Методика определения пожарной опасности электропроводок в стальных трубах [Текст] / Г.И. Смелков, И.Ф. Поединцев, Е.В. Гришин, Е.И. Гайдуков. - М.: ВНИИПО. - 1980. - 11 с.
- 63. Смелков, Г.И. Методы определения причастности к пожарам аварийных режимов в электротехнических устройствах [Текст] / Г.И. Смелков, А.А. Александров, В.А. Пехотиков. - М.: Стройиздат. - 1980. - 59 с.
- Смелков, Г.И. Пожарная опасность электропроводок при аварийных режимах [Текст] / Г.И. Смелков. – М.: Энергоатомиздат. - 1984. – 184 с.
- Смелков, Г.И. Пожарная безопасность электропроводок [Текст] / Г.И. Смелков. М.: ООО «КАБЕЛЬ». - 2009. – 328 с.
- 66. Смелков, Г.И. Справочник по пожарной безопасности электропроводок и электронагревательных приборов [Текст] / Г.И. Смелков, Б.И. Кашолкин, И.Ф. Поединцев. – М.: Стройиздат. - 1997. – 214 с.
- Смирягин, А.П. Промышленные цветные металлы и сплавы [Текст] / А.П. Смирягин, Н.А. Смирягина, А.В. Белова. - М.: Металлургия. - 1974. – 488 с.
- Степанов, Б.В. Диагностика проплавлений металлических элементов электротехнических изделий при пожарах [Текст] / Б.В. Степанов, Е.Р. Россинская, Н.Г. Соколов // Экспертная практика и новые методы исследования. - М.: ВНИИСЭ МЮ СССР. - 1989. - Вып. 9, - С. 1-18.
- Струков, В.М. Экспертное исследование изымаемых с мест пожаров электротехнических изделий с трубчатыми нагревательными элементами [Текст] / В.М. Струков, С.И. Зернов. – М.: ЭКЦ МВД России. – 1996. - 56 с.
- Теория сварочных процессов: Учебник для вузов по специальности «Оборудование и технология сварочного производства» [Текст] / В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др.; под ред. В.В. Фролова. - М.: Высшая школа. - 1988. – 559 с.
- 71. Уманский, Я.С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия [Текст] / Я.С. Уманский. - М.: Металлургия. - 1982. - 632 с.
- Хейкер, Д.М. Рентгеновская дифрактометрия [Текст] / Д.М. Хейкер, Л.С. Зевин. М.: Физматгиз. – 1963. – 380 с.

- 73. Чекирда О.В. Пожарная опасность пускорегулирующих аппаратов газоразрядных ламп при межвитковых КЗ [Текст] / О.В. Чекирда // Пожарная профилактика в электроустановках. -М.: ВНИИПО. - 1981. - С. 66-82.
- 74. Черкасов, В.Н. Пожарная профилактика электроустановок [Текст] / В.Н. Черкасов М.: ВИПТШ 1978. 320 с.
- Чешко, И.Д. Анализ экспертных версий возникновения пожара. В 2-х книгах [Текст] / И.Д.
 Чешко, В.Г. Плотников. Кн.1. СПб: ООО «Типография «Береста». 2010. 708 с.
- 76. Чешко И.Д. Механизм формирования следов протекания сверхтоков по медному проводнику [Текст] / И.Д. Чешко И.Д., А.Ю. Мокряк, С.В. Скодтаев // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России (Научно-практический журнал). – 2015. — №1. – С. 41 – 46.
- 77. Чешко, И.Д. Технические основы расследования пожаров [Текст] / И.Д. Чешко. М.: ВНИИПО. 2002. 330 с.
- Чешко, И.Д. Экспертиза пожаров (объекты, методы, методики исследования) [Текст] / И.Д.
 Чешко. С-Пб.: СПб ИПБ МВД России. 1997. 560 с.
- 79. Чешко, И.Д. Экспертное исследование после пожара контактных узлов электрооборудования в целях выявления признаков больших переходных сопротивлений. Метод. рекомендации [Текст] / И.Д. Чешко, К.Б. Лебедев, А.Ю. Мокряк. - М.: ВНИИПО. -2008. – 60 с.
- Anderson R.N. Surface Analysis of Electrical Arc Residues in Fire Investigation // J. Forensic Sciences. – 1989. - Vol. 34. – p. 633-637.
- Anderson R.N., Brosz H.G., Posey E., Schefelbein B. Recent Advances in Auger Analysis of Electrical Arc Residues // 13th Meeting, Intl. Assn. of Forensic Sciences. – 1993. - p. 162-166.
- Anderson R.N. Which Came First...The Arcing or the Fire? Review of Auger Analysis of Electrical Arc Residues // Fire and Arson Investigator. – 1996. - Vol. 46(3). – p. 38-40.
- Anderson R.N. Scientific Examination of Electrical Arc Residues to Determine Fire Cause // Fire and Arson Investigator. – 1992. - Vol. 42(3). – p. 58-59.
- Anderson R.N. What Came First? The Arc Bead or the Fire? // EC&M. Vol. 100. 2001. p. 20-21.
- Beland B. Elektricel Damages Couse or Consegience? // Journal of Forennsic Seiences. 1984. -Vol. 29. - p. 747-761.
- Beland B. Examination of Arc Beads // Fire and Arson Investigator. 1994. Vol. 44(4). p. 20-22.
- Beland B. Further Comments on Arc Bead Examination // The Fire Place. 1997. Vol. 4. p. 24-28.

- Erlandsson R., Strand G. An Investigation of Physical Characteristics Indicating Primary or Secondary Electrical Damage // Fire Safety J. – 1984. Vol. 8. - p. 97-103.
- Ettling B.V. Problems with Surface Analysis of Copper Beads Applied to the Time of Arcing // The Fire Place. – 1997. - Vol. 4. - p. 21-24.
- 90. Ettling B.V. Electrical Wiring in Building Fires // Fire Technology. 1978. Vol. 14, p. 317-325.
- Gray D.A., Drysdale, D.D., Lewis F.A. Identification of Electrical Sources of Ignition in Fires. // Fire Safety J. – 1983. - Vol. 6. – p. 147-150.
- 92. Hagemue, W. Die metallographische Untersuching von Kupferleitern als Method zur Untercheidung zwischen primaren und sekundaren Kurzschlussen // Schriftenreihe der Deutsch Volkspolizei. – 1963. - № 7-12. – p. 1160-1170.
- Howitt D.G. The Surface Analysis of Copper Arc Beads A Critical Review // J. Forensic Science. – 1997. - Vol. 42. – p. 608-609.
- 94. Howitt D.G. The Chemical Composition of Copper Arc Beads A Red Herring for the Fire Investigator // Fire and Arson Investigator. - 1998. - Vol. 48. - p. 34-39.
- 95. Henderson R., Manning C., Barnhil, S. Questions Concerning the Use of Carbon Content to Identify "Cause" vs. "Result" Beads in Fire Investigations // Fire and Arson Investigator. – 1998. -Vol. 48(3). – p. 26-27.
- Ishibashi Y., and Kishida J. Research on First and Second Fused Mark Discrimination of Electric Wires // Annual Mtg. Japan Assn. for Fire Science and Engrg. – 1990. - p. 83-90.
- 97. Kitamura Y., Satoh K. Progress of the Study on Electrical Beads // Japanese J. Science and Technology for Identification. 2001. Vol. 2. p. 36-39.
- Lee E.P. Discrimination between Primary and Secondary Molten Marks on Electric Wires by DAS // J. Applied Fire Science. – 1999. - Vol. 9 – p. 361-379.
- 99. Lee E.P., Ohtani H., Matsubara Y., Seki T., Hasegawa H., Imada S. Study on Primary and Secondary Molten Marks // 1st Conf. Assn. Korean-Japanese Safety Engineering Society, Korean Institute for Industrial Safety. – 1999. - p. 209-212.
- 100.Lee E.P., Ohtani H., Matsubara Y., Seki T., Hasegawa H., Imada S., Yashiro I. Study on Discrimination between Primary and Secondary Molten Marks Using Carbonized Residue // Fire Safety J. – 2002. - Vol. 7. – p. 353-368.
- 101.Levinson D.W. Copper Metallurgy as a Diagnostic Tool for Analysis of the Origin of Building Fires // Fire Technology. – 1977. - Vol. 13. - p. 211-222.
- 102.Masui M. Possibility of Carbon Inclusion in the Molten Mark of Polyvinyl Chloride Insulated Cords due to a Fire // Trans. IEE Japan. - 1992. - Vol. 112, p. 78-79.
- 103.Metson J.B., Hobbis C.M. The Use of Auger Electron Spectroscopy in Fire Investigations // Chemistry in New Zealand. 1994. Vol. 7. p. 7-9.

- 104.Mitsuhashi N. Discrimination between Primary and Secondary Arc Marks on Electric Wires by Microvoid Distribution // Reports of the National Research Institute of Police Science. - 1995. -Vol. 48 (1). - p. 20-26.
- 105.Reese N.D. Letter to the Editor: Arc Beads // Fire and Arson Investigator. 1998. Vol. 48(4). p. 63-64.
- 106.Satoh K., Fukusima H., Sigeru S., Iwaki M. Verification SIMS Applied to the Fire Investigation for Short Circuit // Annual Mtg. of Japan Assn. for Fire Science and Engrg. 1998. p. 335-336.
- 107.Satoh K., Sugisaki M., Kakizaki S., Itoh C., Saitoh K., Iwaki M. Secondary Ion Mass Spectroscopy (SIMS) and Auger Electron Spectroscopy (AES) Applied to the Fire Investigation for Short Circuit // Annual Mtg. of Japan Assn. for Fire Science and Engrg. – 1996. - p. 282-285.
- 108.Seki T., Hasegawa H., Imada S., Isao Y. Determination between Primary and Secondary Molten Marks on Electric Wires by DAS // National Institute of Testing and Evaluation. – 2000. - Kiryu, Gunma, Japan.
- 109.Singh R.P. Scanning Electron Microscopy of Burnt Electric Wires // Scanning Microscopy. 1987. Vol. 1 (4). p. 1539-1544.
- 110.Takaki A. On the Effect of Thermal Histories upon the Metallographic Structure of Electric Wires, Reports of the National Research Institute of Police Science // Research on Forensic Science. – 1971. - Vol. 24 (2). - p. 48-56.

Приложение А

Акты внедрения

УТВЕРЖДАЮ

Начальник ФГБУ СЭУ ФПС ИПЛ по г. Санкт-Петербургу полковник вн службы Уткин С.В. 20 Fr.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы А.Ю. Мокряка «Установление природы оплавлений медных проводников и латунных токоведущих изделий при экспертизе пожаров на объектах энергетики» по специальности 05.26.03 – пожарная и промышленная безопасность

Комиссия в составе:

Председатель: Начальник ФГБУ СЭУ ФПС ИПЛ по г. Санкт-Петербургу полковник вн. службы Уткин С.В.

Члены комиссии: начальник сектора исследовательских и испытательных работ в области пожарной безопасности ФГБУ СЭУ ФПС ИПЛ по г. Санкт-Петербургу майор внутренней службы Семенова Н.В., инженер сектора исследовательских и испытательных работ в области пожарной безопасности ФГБУ СЭУ ФПС ИПЛ по г. Санкт-Петербургу капитан внутренней службы Недокус К.С.,

настоящим актом подтверждает, что результаты диссертационной работы Мокряка Андрея Юрьевича «Установление природы оплавлений медных проводников и латунных токоведущих изделий при экспертизе пожаров на объектах энергетики» внедрены в практическую деятельность Федерального государственного бюджетного учреждения судебнослужбы учреждение федеральной противопожарной экспертное испытательная пожарная лаборатория (ФГБУ СЭУ ФПС ИПЛ) по г. Санкт-Петербургу.

Основные положения диссертационной работы Мокряка А.Ю., в частности, признаки протекания по медным проводникам сверхтока, используются в практической работе сотрудников испытательной пожарной лаборатории при проведении экспертиз по делам о пожарах.

Внедрение предлагаемой методики экспертного исследования после пожара оплавлений латунных деталей и медных проводников позволяет повысить достоверность выводов пожарно-технического эксперта.

Председатель комиссии:

Начальник ФГБУ СЭУ ФПС ИПЛ по г. Санкт-Петербургу полковник внутренней службы

Auch

С.В. Уткин

Члены комиссии: Начальник сектора исследовательских и испытательных работ в области пожарной безопасности ФГБУ СЭУ ФПС ИПЛ по г. Санкт-Петербургу майор внутренней службы

Инженер сектора исследовательских и испытательных работ в области пожарной безопасности ФГБУ СЭУ ФПС ИПЛ по г. Санкт-Петербургу капитан внутренней службы

К.С. Недокус

Н.В. Семенова

УТВЕРЖДАЮ



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы А.Ю. Мокряка «Установление природы оплавлений медных проводников и латунных токоведущих изделий при экспертизе пожаров на объектах энергетики» по специальности 05.26.03 – пожарная и промышленная безопасность

Комиссия в составе:

Председатель: Начальник ФГБУ СЭУ ФПС ИПЛ по Ярослаеской области полковник вн. службы Дмитриев А.Л.

Члены комиссии: начальник сектора судебных экспертиз майор вн. службы Ободков Андрей Константинович (высшее техническое образование, специальность инженер-механик, экспертные специализации «Реконструкция процесса возникновения и развития пожара», «Рентгенофазовый анализ при исследовании объектов СПГЭ», «Металлографические и морфологические исследования металлических объектов СПТЭ», стаж работы в области исследования пожаров 11 лет);

старший эксперт сектора судебных экспертиз майор вн. службы Соловьёв Антон Александрович (зысшее профессиональное образование, специализация инженер пожарной безопасности, экспертные специализации «Реконструкция процесса возникновения развития пожара», И «Рентгенофазовый объектов анализ при исследовании СПТЭ», «Металлографические и морфологические исследования металлических объектов СПТЭ», стаж работы в области исследования пожаров 14 лет);

эксперт сектора судебных экспертиз майор вн. службы Пепин Сергей Евгеньевич (высшее юридическое образование, экспертная специализация «Металлографические и морфологические исследования металлических объектов СПТЭ», стаж работы в области исследования пожаров 15 лет).

настоящим актом подтверждает, что результаты диссертационной работы Мокряка Андрея Юрьевича «Установление природы оплавлений медных проводников и латунных токоведущих изделий при экспертизе пожаров на объектах энергетики» внедрены в практическую деятельность Федерального государственного бюджетного учреждения судебно-экспертное учреждение федеральной противопожарной службы испытательная пожарная лаборатория (ФГБУ СЭУ ФПС ИПЛ) по Ярославской области. На основании опубликованных в научных журналах работ, основанных на положениях данной диссертационной работы, экспертами лаборатории выполняются пожарно-технические экспертизы, связанные с исследованием электротехнических объектов (медных кабельных изделиях, латунных контактов), изымаемых с мест пожаров. В частности, результаты диссертационной работы дают возможность пожарно-техническим экспертам трактовать признаки, которые ранее выявлялись при исследовании электротехнических объектов, изъятых с мест пожаров, но не могли быть интерпретированы, в связи с не изученностью.

Это положительным образом сказывается на качестве выполнения пожарно-технических экспертиз, обоснованности и достоверности выводов эксперта.

Председатель комиссии:

Начальник ФГБУ СЭУ ФПС ИПЛ по Ярославской области полковник вн. службы

ФГБУ СЭУ ФПС ИПЛ по Ярославской области

майор вн. службы

А.Л. Дмитриев

Члены комиссии:

Начальник сектора судебных экспертиз ФГБУ СЭУ ФПС ИПЛ по Ярославской области майор вн. службы

Старший эксперт сектора судебных экспертиз

А.К. Ободков

А.А. Соловьев

Эксперт сектора судебных экспертиз ФГБУ СЭУ ФПС ИПЛ по Ярославской области майор вн. службы

С.Е. Пепин



АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования соискателя ученой степени кандидат технических наук Мокряка Андрея Юрьевича на тему: «Установление природы оплавлений медных проводников и латунных токоведущих изделий при экспертизе пожаров на объектах энергетики в учебный процесс

Комиссия в составе:

председателя – начальника кафедры криминалистики и инженернотехнических экспертиз кандидата технических наук, доцента Бельшиной Ю.Н.

членов комиссии:

профессора кафедры криминалистики и инженерно-технических
 экспертиз, доктора технических наук, профессор Моторыгина Ю.Д.;

профессора кафедры криминалистики и инженерно-технических
 экспертиз, доктора технических наук, профессора Галишева М.А.,.

составила настоящий акт в том, что основные положения и выводы диссертационного исследования Мокряка А.Ю., а именно предложенная им аналитическая схема экспертного анализа после пожара оплавлений медных проводников и определенные диагностические критерии, позволяющие определить причину разрушения при пожаре латунных контактов, внедрены в
учебный процесс кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз.

Разработанные автором методические основы экспертного исследования после пожара оплавлений медных проводников токами перегрузки, а также латунных токоведущих изделий, используются в учебно-методическом обеспечении дисциплин «Пожарно-техническая экспертиза» и «Экспертиза пожаров».

Председатель комиссии:

Начальник кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз к.т.н., доцент

Ю.Н. Бельшина

Члены комиссии: Профессор кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз д.т.н., профессор

Профессор кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз

д.т.н., профессор

М.А. Галишев

Jan/ Jan/-

Ю.Д. Моторыгин