

ОХРАНА ТРУДА, ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ (НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ) / LABOR PROTECTION, INDUSTRIAL SAFETY, SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS (SUBSOIL USE)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.93>

МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕДНЫХ ПРОВОДНИКОВ, ПРОЛОЖЕННЫХ В ГОФРИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБАХ, ПОСЛЕ ТОКОВЫХ ПЕРЕГРУЗОК

Научная статья

Чикулаева Е.М.¹, Шеков А.А.², Беляк А.Л.^{3,*}

²ORCID : 0000-0003-2111-718X;

³ORCID : 0000-0001-9142-7381;

¹ Судебно-экспертное учреждение федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по Красноярскому краю, Красноярск, Российская Федерация

² Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Российская Федерация

³ Восточно-Сибирский институт МВД России, Иркутск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (blaxr[at]mail.ru)

Аннотация

Тепловое проявление аварийного режима работы электроустановок в результате нарушений их устройства и эксплуатации остается одной из распространенных причин возникновения пожара. В настоящей статье рассматриваются результаты морфологического исследования подвергнутых токовой перегрузке медных однопроволочных проводников, проложенных открытым способом и в гофрированных полимерных трубах. Установлено, что изменение условий тепло- и газообмена с окружающей средой при прокладке электрических проводников в полимерных гофрированных трубах влияет на физико-химические процессы, протекающие в проводниках, и на формирование признаков аварийного режима работы электрической сети. Показано влияние кратности перегрузки электрических проводников на степень термических повреждений полимерных гофрированных труб.

Ключевые слова: медные электрические проводники, гофрированные полимерные трубы, токовые перегрузки, причина пожара, морфологическое исследование.

A MORPHOLOGICAL STUDY OF COPPER CONDUCTORS LAID IN CORRUGATED POLYMER PIPES AFTER CURRENT OVERLOADS

Research article

Chikulaeva Y.M.¹, Shekov A.A.², Belyak A.L.^{3,*}

²ORCID : 0000-0003-2111-718X;

³ORCID : 0000-0001-9142-7381;

¹ Forensic Expert Institution of the Federal Fire Service "Fire Testing Laboratory" in the Krasnoyarsk Territory, Krasnoyarsk, Russian Federation

² Siberian Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Zheleznogorsk, Russian Federation

³ East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Irkutsk, Russian Federation

* Corresponding author (blaxr[at]mail.ru)

Abstract

Thermal manifestation of emergency operation mode of electrical installations as a result of violations of their design and operation remains one of the common causes of fires. In the present article the results of morphological study of copper single-wire conductors subjected to current overload, laid by open method and in corrugated polymer pipes are reviewed. It is established that the change of conditions of heat and gas exchange with environment at laying of electric conductors in polymeric corrugated pipes influences on physical and chemical processes occurring in conductors and on formation of signs of emergency mode of electric network operation. The influence of the multiplicity of overload of electrical conductors on the degree of thermal damage to polymer corrugated pipes is demonstrated.

Keywords: copper electrical conductors, corrugated polymer pipes, current overloads, cause of fire, morphological study.

Введение

Анализ статистических данных показывает, что тепловое проявление аварийного режима работы электрооборудования в результате нарушений их устройства и эксплуатации остается одной из основных причин возникновения пожаров в Российской Федерации [1]. При этом наибольшей пожарной опасностью характеризуются электрические проводники (провода и кабели), загорание полимерной изоляции которых происходит в результате термического воздействия сверхтока, возникающего вследствие аварийных режимов работы электросети. Выделяемая при данных процессах тепловая энергия зачастую является достаточной для начала пиролиза изоляции и последующего ее воспламенения.

Причастность к возникновению горения устанавливают в ходе инструментального исследования фрагментов электрических проводников со следами оплавления при производстве судебной пожарно-технической экспертизы с применением морфологического, рентгенофазового, металлографического и иных методов анализа [2]. На

первоначальном этапе исследования проводников, как правило, устанавливается состояние изоляции, жилы проводника, наличие и форма оплавлений, наличие пор, вздутий, утолщений и иных признаков, на формирование которых могут влиять ряд факторов, таких как величина сверхтока, длительность дугового процесса, способ прокладки электрической проводки [3], [4].

На сегодняшний день прокладка электрической сети в жилых многоквартирных домах зачастую осуществляется в поливинилхлоридных кабель-каналах, гладких и гофрированных полимерных трубах. По сравнению с проводниками, проложенными непосредственно по поверхности конструктивных элементов зданий и сооружений, ограниченный объем полимерных кабель-каналов и труб влияет на условия тепло- и газообмена при аварийном режиме работы электрической сети и, соответственно, на указанные признаки протекающих тепловых процессов [5].

На основании вышеизложенного, целью исследования является анализ повреждений токоведущих жил медных проводников, проложенных открытым способом и в гофрированных полимерных трубах, которые получены в результате теплового проявления аварийного режима работы электрической сети в виде токовых перегрузок.

Методы и принципы исследования

Для моделирования токовой перегрузки использовалось устройство для проверки токовых расцепителей автоматических выключателей УПТР-1МЦ, позволяющее задавать регулируемые токи нагрузки в диапазоне от 1А до 5000А переменного и постоянного тока.

В качестве объекта исследования использовали кабель марки ВВГ-Пнг (А) - LS 2x1,5 N-0,66, площадью сечения жилы 1,5 мм².

Моделирование токовой перегрузки осуществлялось при комнатной температуре и нормальном содержании кислорода. Для проведения эксперимента использовались образцы кабеля длиной 50 см, которые закреплялись в держателях. При этих условиях через проводник пропускали токи перегрузки различной кратности – от 2 до 20. Для медного проводника площадью сечения 1,5 мм² предельно допустимым значением тока является ток порядка 19 А. Соответственно, в ходе моделирования токовой перегрузки через проводник данного сечения пропускали ток силой от 38А до 380А. При воздействии сверхтока на проводник, происходит нагрев токоведущей жилы, в результате чего происходит увеличение сопротивления и в соответствии с законом Ома уменьшение силы тока. Таким образом, в процессе эксперимента проводник подвергался силе тока не конкретного значения, а в определенном диапазоне, а именно 38А (2 кр), 76А-58А (4-3 кр), 114А-66А (6-3,5 кр), 152А-85А (8-4,5 кр), 190А-95А (10-5 кр), 228А-105А (12-5,5 кр), 266А-114А (14-6 кр), 304А-125А (16-6,6 кр), 342А-142А (18-7,5 кр), 380А-165А (20-8,7кр).

При каждом значении кратности перегрузки эксперимент проводился с кабелем, проложенным в горизонтальном положении открытым способом и в гибких гофрированных трубах из композиций поливинилхлорида (ПВХ) и полиэтилена низкого давления (ПНД) внешним диаметром 16 мм, 20 мм и 25 мм. Визуальное исследование проводилось невооруженным глазом, а также применялись увеличительная лупа и стереомикроскоп.

В процессе исследования отмечались характерные повреждения токоведущей жилы, изоляции и оболочки экспериментальных образцов при различных кратностях тока перегрузки и способов прокладки.

Основные результаты

В результате исследования установлено, что сверхтоки силой от 38А (2 кр) до 76А (4 кр) не вызывают повреждений самого медного проводника, которые можно было бы зафиксировать при визуальном исследовании. На экспериментальных образцах наблюдаются участки, где их поверхность приобрела матовый оттенок (Рисунок 1а). Так же имеются участки на поверхности токоведущей жилы, где присутствует частично окись (Рисунок 1б).

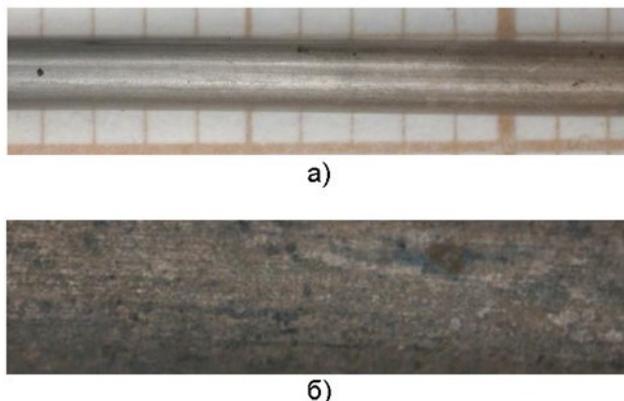


Рисунок 1 - Вид поверхности, характерной для медных проводников (экспериментальных образцов), после воздействия сверхтока силой от 38А (2 кр) до 76А (4 кр)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.93.1>

Не зависимо от способа прокладки провода воздействие сверхтока силой от 114А (6 кр) до 152А (8 кр) может приводить к появлению на поверхности образцов участков с поперечными и продольными трещинами (рис. 2).

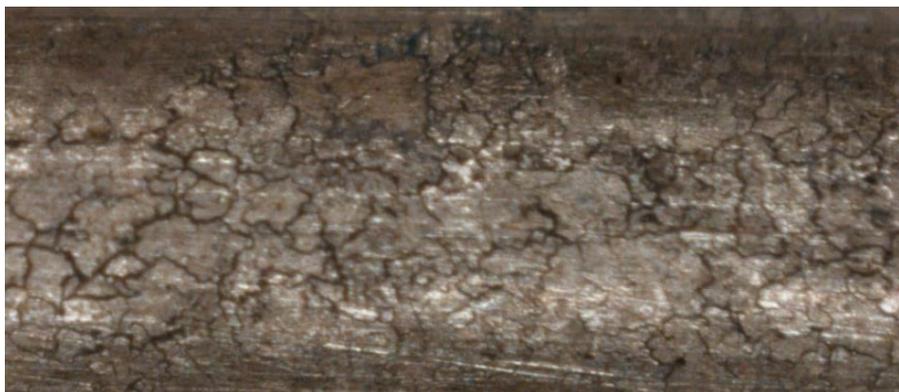


Рисунок 2 - Вид поверхности с поперечными и продольными трещинами, характерной для медных проводников (экспериментальных образцов), после воздействия сверхтока силой от 114А (6 кр) до 152А (8 кр)
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.93.2>

При воздействии сверхтока силой от 114А до (6 кр) до 190А (10 кр) проводник становится хрупким и ломается при 2-3-х перегибах. При воздействии сверхтоков силой ниже 114А (6 крат) и выше 190А (10 крат) проводники сохраняют свою пластичность. Анализируя полученные данные, можно отметить, что на хрупкость медного проводника оказывает влияние как величина силы тока, так и время воздействия. Чем выше показатель силы тока, тем выше температура нагрева проводника, и ниже длительность воздействия на проводник (время от начала воздействия сверхтока до разделения его на части). Таким образом, на хрупкость медного проводника оказывает влияние, как температура, так и длительность теплового воздействия.

Результатом воздействия сверхтока силой от 152А (8 кр) до 190А (10 кр) является наличие на поверхности проводника утолщений и поверхностных оплавлений (рис. 3-5).



Рисунок 3 - Вид поверхностного оплавления, характерного для медных проводников (экспериментальных образцов), после воздействия сверхтока силой от 152 А (8 кр) до 190 А (10 кр)
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.93.3>



Рисунок 4 - Вид утолщения, характерного для медных проводников (экспериментальных образцов), после воздействия сверхтока силой от 152 А (8 кр) до 190 А (10 кр)
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.93.4>

При изучении динамики образования утолщений и утончений (шеек) на поверхности проводника установлено, что повреждения формируются уже после разрыва, то есть в процессе остывания проводника. По мере остывания проводника происходит увеличение диаметра сечения в одном месте и потеря сечения в другом. В работе [3] выдвинуто предположение о том, что формирование из расплавленного металла (жидкой фазы) на поверхности проводника (твердой фазы) наблюдаемых в последствии утолщений 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 [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. Очевидно, после разрыва проводника, за счет сил поверхностного натяжения, жидкая (расплавленная часть) проводника пытается сократить поверхность раздела фаз до минимума и приобрести шарообразную форму, образуя при этом утолщение [6].

При протекании по проводнику сверхтока происходит нагрев проводника до температуры плавления меди, что в дальнейшем приводит к его фрагментации (разделению медного проводника на части). К подобным повреждениям приводит воздействие сверхтока силой от 152А и выше. При разделении медного проводника на части, на его концах в зонах разрыва могут образовываться оплавления различной формы: вытянутые произвольной формы, каплеобразной, конусообразной, округлой. Морфология таких оплавлений сходна с последствиями воздействия тепла пожара.

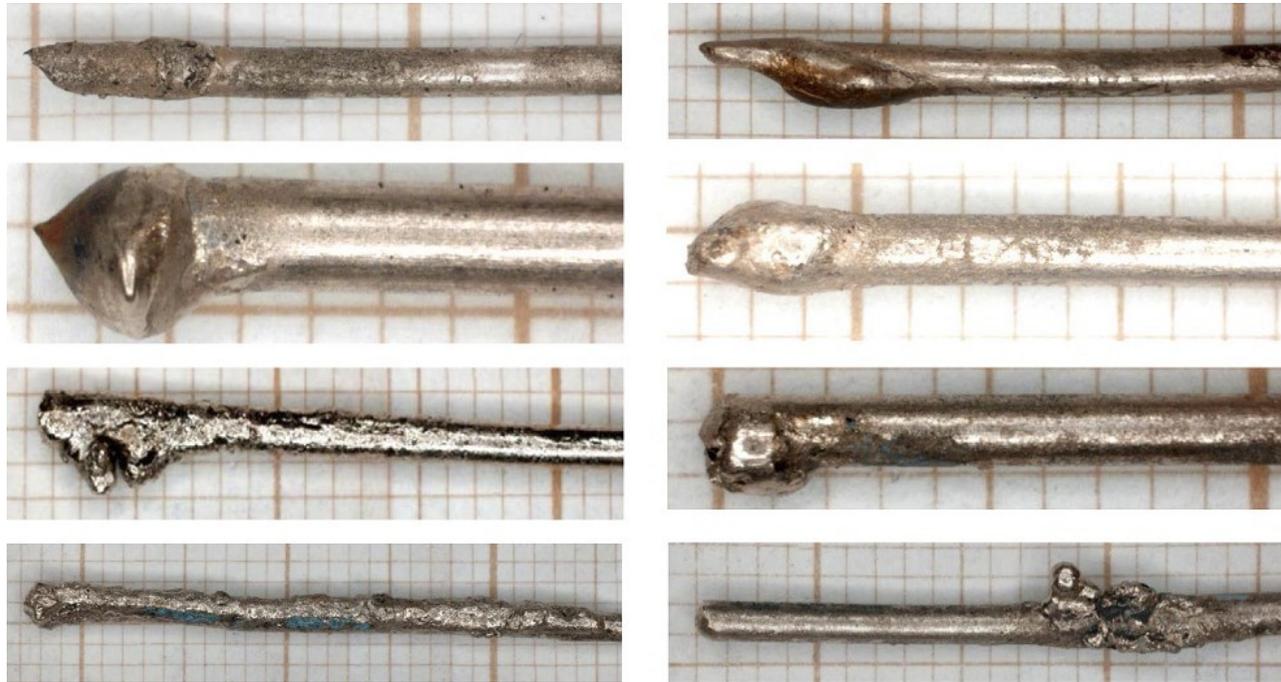


Рисунок 5 - Вид оплавлений, характерных для медных проводников (экспериментальных образцов), после воздействия сверхтока силой от 152 А (8 кр) и выше
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.93.5>

В результате проведенных экспериментов было установлено, что сверхтоки силой от 228 А (12кР) и выше могут вызывать образование на поверхности токоведущих жил мелких округлых оплавлений в виде шаровидных наплывов (рис. 6). В работе [7] отмечается, что при зарождении очага разрушения твердого тела происходит рост зародыша в жидкой фазе, затем образование пузырьков пара в жидкости при ее кавитации и последующее преобразование в цепочку полостей в твердой фазе. В работе [8] показана роль пластической дисторсии в механизме пластической деформации и разрушении твердых тел. Таким образом, под действием сверхтока в медном проводнике происходят сложные физические процессы на уровне кристаллической решетки [9].



Рисунок 6 - Вдутья, образовавшиеся на поверхности медных проводников в результате протекания сверхтока силой 228 А и выше

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.93.6>

При исследовании экспериментальных образцов, подвергшихся сверхтокам силой 228 А (12 кР) и выше установлен факт образования излома в месте разрыва токоведущих жил (рис. 7а). На поверхности излома наблюдается микрорельеф в виде ямок или сот (рис. 7б).



Рисунок 7 - Вид поверхности излома, характерный для токоведущих жил экспериментальных образцов в результате воздействия сверхтока силой от 228А (12 кР) и выше

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.93.7>

Сотовый рельеф представляет собой микрорельеф поверхности разрушения в виде мелких плоских ямок. Указанный микрорельеф свидетельствует о малой доле локальной пластической деформации. В свою очередь ямки – это микроуглубления на поверхности разрушения, представляющие собой вскрытые поверхности микропустот, образующихся в процессе пластического течения металла. Согласно РД 50-672-88 [10] вязкий излом – излом, при котором разрушение осуществляется по механизму слияния микропустот, признаком которого является наличие элементов микрорельефа в виде ямок [10], [11]. Таким образом, на поверхности излома токоведущих жил имеются признаки вязкого излома в виде сотового рельефа.

При протекании по проводнику токов, превышающих предельно допустимые значения, происходит разогрев и размягчение изоляции жил и оболочки кабеля и их карбонизация.

В результате исследования установлено, что сверхтоки кратностью не более двух не вызывают повреждения изоляции, оболочки и гофрированной трубы в которой были проложены экспериментальные образцы. К термической деструкции изоляции со стороны токоведущей жилы, т.е. плавлению и карбонизации приводит воздействие сверхтока силой от 58 А (3 кР) и выше. Воздействие на экспериментальные образцы сверхтоков силой от 152 А (8 кР) до 266 А (14) приводит к карбонизации (обугливанию) изоляции токоведущей жилы и оболочки кабеля, которые при механическом воздействии осыпаются (рис. 8а-8е). При воздействии на экспериментальные образцы сверхтока силой от 304 А (16 кР) до 380 А (20 кР) оболочка кабеля со стороны токоведущей жилы оплавляется по всей длине и имеет сквозные прогары (рис. 8 ж, 8 з). Подобные повреждения характерны как для образцов проложенных открытым способом, так и для образцов, проложенных в гофрированных трубах.

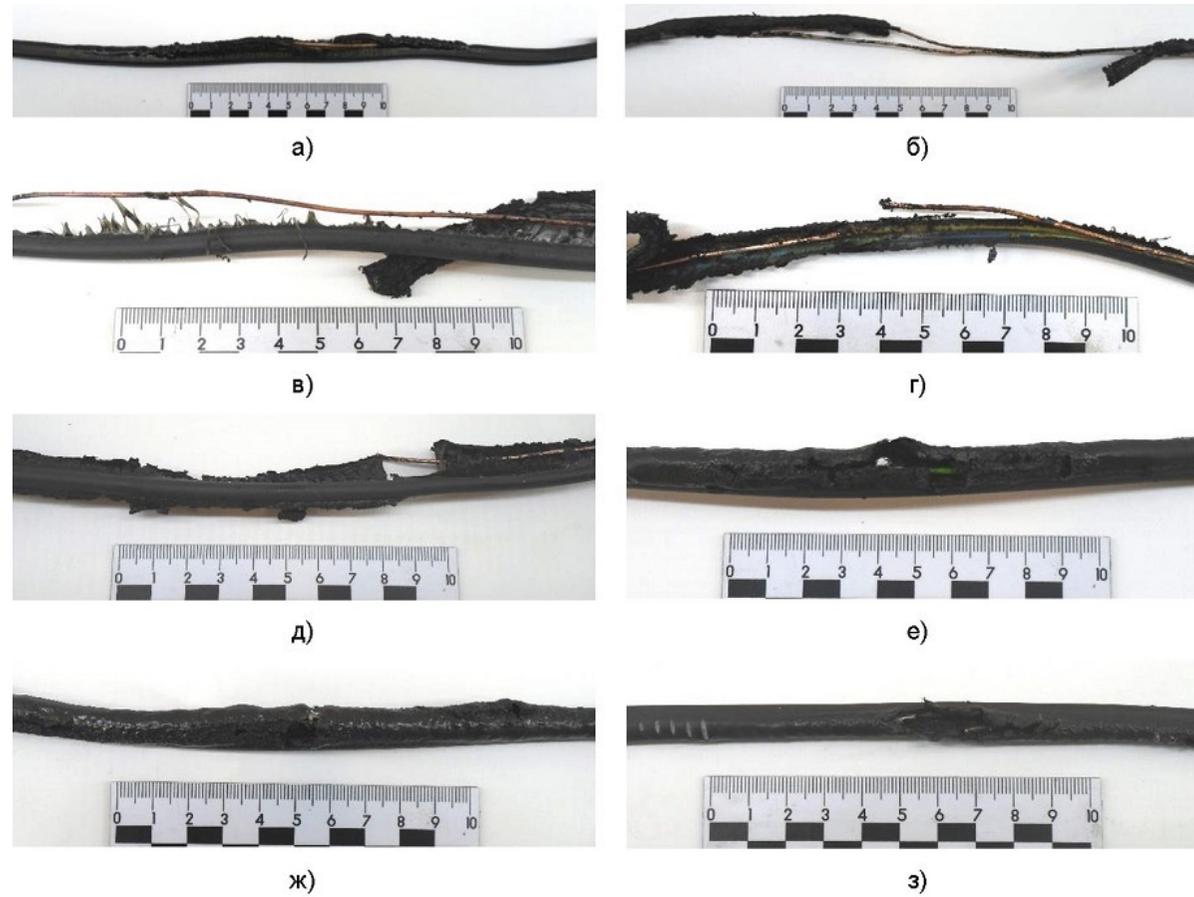


Рисунок 8 - Повреждения изоляции и оболочки в результате воздействия сверхтока различной силы:
а - 76 А (4 кВ); б - 114 А (6 кВ); в - 152 А (8 кВ); г - 190 А (10 кВ); д - 228 А (12 кВ); е - 266 А (14 кВ); ж - 304 А (16 кВ); з - 380 А (20 кВ)
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.93.8>

Воздействие на проводник сверхтока различной силы, приводит к его нагреву до определенных температур. В результате тепловыделения происходит повреждение гофрированных труб. В ходе проведенных исследований было установлено, что степень повреждений зависит от силы тока, воздействующего на проводник. Площадь плавления гофры обратно пропорциональна ее диаметру, т.е. чем больше диаметр, тем меньше площадь плавления.

При воздействии на проводник сверхтока силой 76 А в результате нагрева и термической деструкции изоляции происходит плавление гофры на небольших участках не зависимо от ее вида (ПВХ, ПНД) и диаметра (рис. 9 а, 9б).

С увеличением силы воздействующего тока до 114 А (6 кр), площадь оплавленного участка увеличивается. На гофрированных трубах, выполненных из ПВХ, появляются сквозные прогары (рис. 9 в, 9г).



Рисунок 9 - Характерные повреждения гофрированных труб, выполненных из ПВХ (а, в) и ПНД (б, г) после воздействия сверхтока силой от 76 А (4 кр) (а, б) и от 114 А (6 кр) (в, г)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.93.9>

При сверхтоках силой 152 А (8 кр)-190 А (10 кр) плавление гофрированной трубы происходит по всей длине каждого образца, имеются сквозные прогары (рис. 10).



Рисунок 10 - Характерные повреждения гофрированных труб на экспериментальных образцах, после воздействия сверхтока 152А (8 кр) - 190 А (10 кр)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.93.10>

При воздействии сверхтока силой 228 А (12 кр) гофрированные трубы, выполненные из ПВХ, оплавлены по всей длине каждого образца, и имеют сквозные прогары. На поверхности гофрированной трубы диаметром 25 мм площадь сквозного прогара значительно меньше, чем на поверхности образцов диаметром 16 мм и 20 мм (рис. 11а-11в). Гофрированная труба, выполненная из ПНД имеющая диаметр 16 мм, так же оплавлена по всей длине, и имеет сквозные прогары (рис. 11г). Гофрированные трубы диаметром 20 мм и 25 мм оплавлены не по всей длине, а на локальных участках. Сквозных прогаров на данных гофрированных трубах не имеется (рис. 11д, 11е).



Рисунок 11 - Характерные повреждения гофрированных труб, после воздействия сверхтока силой 228 А (12 кр):
 а-в - на поверхности образцов диаметром 16 мм и 20 мм; г - гофрированная труба, выполненная из ПНД имеющая диаметр 16 мм, оплавленная по всей длине, и имеющая сквозные прогары; д-е - гофрированные трубы диаметром 20 мм и 25 мм оплавленные не по всей длине, а на локальных участках, сквозных прогаров на данных гофрированных трубах не имеется

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.93.11>

В результате воздействия на образцы электрического кабеля сверхтока силой от 266А и выше гофрированные трубы оплавлены не по всей длине, а на локальных участках (рис. 12).



Рисунок 12 - Характерные повреждения гофрированных труб на экспериментальных образцах, после воздействия сверхтока силой от 266А (14 кр)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.93.12>

Это связано с тем, что время от начала проведения эксперимента до разрыва токоведущей жилы уменьшается. Соответственно уменьшается время теплового воздействия на гофрированные трубы. Чем показатель силы тока выше, тем меньше протяженность оплавленного участка.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований было установлено следующее:

- при воздействии сверхтока на проводник происходит нагрев токоведущей жилы, в результате чего происходит увеличение сопротивления проводника и, следовательно, уменьшение силы тока. Таким образом, при моделировании токовой перегрузки, на проводник действует сверхток не постоянной силы, а в определенном диапазоне;
- диапазон уменьшения силы тока зависит как от способа прокладки проводников, так и от силы тока оказывающей воздействие. При прокладке проводника в гофрированной трубе, не зависимо от вида и диаметра, ток уменьшается сильнее, чем на проводнике проложенного открытым способом. Это связано с нарушением теплообмена. Однако при воздействии на проводники сверхтока силой 228А (12 кратная перегрузка) и выше, уменьшение силы тока не зависит от способа прокладки проводника;

- двухкратная токовая перегрузка не вызывает повреждений как самих медных проводников, так и повреждения изоляции токоведущей жилы, оболочки кабеля и гофрированной трубы, в которой были проложены данные проводники;

- сверхтоки силой от 76А (4 кр) приводят к термической деструкции изоляции со стороны токоведущей жилы и частичному плавлению гофры. Повреждений самого медного проводника, сверхтоки данной силы, не вызывают;

- в результате экспериментов установлено, что при протекании по проводнику токов, превышающих предельно допустимые значения, происходит разогрев и размягчение изоляции жил и оболочки кабеля и их карбонизация;

- установлена зависимость от кратности тока перегрузки степени повреждения изоляции жилы, оболочки кабеля и гофрированных труб, в которых они проложены;

- признаки термического проявления сверхтока на медном проводнике формируются на его поверхности не по всей длине, а на отдельных участках;

- не зависимо от способа прокладки провода действие сверхтока силой от 114А (6 кр) до 152А (8 кр) может приводить к появлению на его поверхности поперечных и продольных трещин;

- при воздействии сверхтока силой от 114А (6 кр) до 190А (10 кр) проводник становится хрупким при 2-3-х перегибах ломается. При воздействии сверхтоков силой ниже 114А (6 кр) и выше 190А (10 кр) проводники сохраняют свою пластичность. Анализируя полученные данные, можно отметить, что на хрупкость медного проводника оказывает влияние как величина силы тока, так и время воздействия. Чем выше показатель силы тока, тем выше температура нагрева проводника, и ниже длительность воздействия на проводник (время от начала воздействия на проводник до разделения его на части). Таким образом, на хрупкость медного проводника оказывает влияние, как температура, так и длительность теплового воздействия;

- наличие на поверхности проводника утолщений, поверхностных оплавлений является результатом воздействия сверхтока силой от 152А (8 кр) до 190А (10 кр);

- воздействие сверхтока силой от 152А и выше приводит к разделению медного проводника на части;

- при разделении медного проводника на части в результате токовой перегрузки, на его концах в зонах разрыва могут образовываться оплавления различной формы: вытянутые произвольной формы, каплеобразной, конусообразной, округлой. Морфология таких оплавлений сходна с последствиями воздействия тепла пожара.

Полученные зависимости, характеризующие влияние кратности токовых перегрузок на изменение признаков аварийных тепловых процессов в проводнике, повреждение полимерных гофрированных труб в научной литературе ранее отражены не были. Данные результаты могут быть использованы специалистами при расследовании и экспертизе пожаров, связанных с аварийными режимами работы электрических сетей.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.93.13>

Conflict of Interest

None declared.

Review

International Research Journal Reviewers Community
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.93.13>

Список литературы / References

1. Чечетина Т.А. Обстановка с пожарами в российской федерации в 2022 году / Т.А. Чечетина, В.И. Сибирко, В.С. Гончаренко [и др.] // Пожарная безопасность. — 2023. — № 1 (110). — С. 92-109.
2. Мокряк А.Ю. Экспертное исследование после пожара медных проводников / А.Ю. Мокряк, И.Д. Чешко, А.Ю. Парийская [и др.] — СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2019. — 110 с.
3. Чешко И.Д. Механизм формирования следов протекания сверхтоков по медному проводнику / И.Д. Чешко, А.Ю. Мокряк, С.В. Скюдтаев // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. — 2015. — № 1. — С. 41-46.
4. Кузнецов К.Л. Влияние токов перегрузки на формирование структуры металла в зонах разрушений медных проводников / К.Л. Кузнецов, А.А. Шеков // Вестник Восточно-Сибирского института МВД России. — 2016. — № 1 (76). — С. 97-105.
5. Алдатов Ю.С. Влияние способа прокладки медной электропроводки на определение условий протекания токовых перегрузок методом металлографического анализа / Ю.С. Алдатов, В.Ю. Крисанова, Г.В. Плотникова [и др.] // Сибирский пожарно-спасательный вестник. — 2021. — № 2 (21). — С. 13-18. — DOI: [10.34987/vestnik.sibpsa.2021.76.22.002](https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2021.76.22.002).
6. Семенченко В.К. Поверхностные явления в металлах и сплавах / В.К. Семенченко. — М.: Гостехиздат, 1957. — 491 с.
7. Васильев Л.С. Структурно-фазовые превращения и критические явления при интенсивном пластическом деформировании и разрушении металлов и сплавов: дис. ... д-ра физ.-мат. наук / Л.С. Васильев. — Ижевск, 2010. — 405 с.
8. Панин В.Е. Пластическая дисторсия – фундаментальный механизм в нелинейной мезомеханике пластической деформации и разрушения твердых тел / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, А.В. Панин [и др.] // Физическая мезомеханика. — 2016. — Т.19. — №1. — С. 31-46.
9. Недобитков А.И. Особенности токовой перегрузки в автомобильной электрической цепи / А.И. Недобитков // Пожаровзрывобезопасность. — 2019. — Т. 28. — № 4. — С. 42-50. — DOI: [10.18322/PVB.2019.28.04.42-50](https://doi.org/10.18322/PVB.2019.28.04.42-50).

10. РД 50-672-88. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Классификация видов изломов металлов. — М.: Издательство стандартов, 1989. — 21 с.

11. Недобитков А.И. Фрактография изломов медных проводников автомобильной электрической цепи / А.И. Недобитков // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25. — № 2. — С. 21-27. — DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.21-27.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Chechetina T.A. Obstanovka s pozharimi v rossijskoj federacii v 2022 godu [Fire Situation in the Russian Federation in 2022] / T.A. Chechetina, V.I. Sibirko, V.S. Goncharenko [et al.] // Pozharnaja bezopasnost' [Fire Safety]. — 2023. — № 1 (110). — P. 92-109. [in Russian]

2. Mokrjak A.Ju. Jekspertnoe issledovanie posle pozhara mednyh provodnikov [Expert Study of Copper Conductors after a Fire: Methodological Recommendations] / A.Ju. Mokrjak, I.D. Cheshko, A.Ju. Parijskaja [et al.] — SPb.: St. Petersburg University of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2019. — 110 p. [in Russian]

3. Cheshko I.D. Mehanizm formirovanija sledov protekanija sverhtokov po mednomu provodniku [The Mechanism of Formation of Traces of Supercurrent Flow through a Copper Conductor] / I.D. Cheshko, A.Ju. Mokrjak, S.V. Skodtaev // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MChS Rossii [Bulletin of the St. Petersburg University of the Ministry of Emergency Situations of Russia]. — 2015. — № 1. — P. 41-46. [in Russian]

4. Kuznecov K.L. Vlijanie tokov peregruzki na formirovanie struktury metalla v zonah razrushenij mednyh provodnikov [The Influence of Overload Currents on the Formation of the Metal Structure in Zones of Destruction of Copper Conductors] / K.L. Kuznecov, A.A. Shekov // Vestnik Vostochno-Sibirskogo instituta MVD Rossii [Bulletin of the East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia]. — 2016. — № 1 (76). — P. 97-105. [in Russian]

5. Aldatov Ju.S. Vlijanie sposoba prokladki mednoj jelektroprovodki na opredelenie uslovij protekanija tokovyh peregruzok metodom metallograficheskogo analiza [The Influence of the Method of Laying Copper wiring on Determining the Conditions for Current Overloads Using Metallographic Analysis] / Ju.S. Aldatov, V.Ju. Krisanova, G.V. Plotnikova [et al.] // Sibirskij pozharo-spatatel'nyj vestnik [Siberian Fire and Rescue Bulletin]. — 2021. — № 2 (21). — P. 13-18. — DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2021.76.22.002. [in Russian]

6. Semenchenko V.K. Poverhnostnye javlenija v metallah i splavah [Surface Phenomena in Metals and Alloys] / V.K. Semenchenko. — M.: Gostehizdat, 1957. — 491 p. [in Russian]

7. Vasil'ev L.S. Strukturno-fazovyje prevrashhenija i kriticheskie javlenija pri intensivnom plasticheskom deformirovanii i razrushenii metallov i splavov [Structural-phase Transformations and Critical Phenomena during Intense Plastic Deformation and Destruction of Metals and Alloys]: dis. ... of PhD in Physical and Mathematical Sciences / L.S. Vasil'ev. — Izhevsk, 2010. — 405 p. [in Russian]

8. Panin V.E. Plasticheskaja distorsija – fundamental'nyj mehanizm v nelinejnoj mezomehanike plasticheskoj deformacii i razrushenija tverdyh tel [Plastic Distortion is a Fundamental Mechanism in the Nonlinear Mesomechanics of Plastic Deformation and Fracture of Solids] / V.E. Panin, V.E. Egorushkin, A.V. Panin [et al.] // Fizicheskaja mezomehanika [Physical Mesomechanics]. — 2016. — Vol. 19. — № 1. — P. 31-46. [in Russian]

9. Nedobitkov A.I. Osobennosti tokovoj peregruzki v avtomobil'noj jelektricheskoj cepi [Features of Current Overload in an Automobile Electrical Circuit] / A.I. Nedobitkov // Pozharovzryvobezopasnost' [Fire and Explosion Safety]. — 2019. — Vol. 28. — № 4. — P. 42-50. — DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.42-50. [in Russian]

10. RD 50-672-88. Metodicheskie ukazanija. Raschety i ispytanija na prochnost'. Klassifikacija vidov izlomov metallov [Methodical instructions. Calculations and strength tests. Classification of types of metal fractures]. — M.: Publishing House of Standards, 1989. — 21 p. [in Russian]

11. Nedobitkov A.I. Fraktografija izlomov mednyh provodnikov avtomobil'noj jelektricheskoj cepi [Fractography of Kinks in Copper Conductors of an Automotive Electrical Circuit] / A.I. Nedobitkov // Pozharovzryvobezopasnost' [Fire and Explosion Safety]. — 2016. — Vol. 25. — № 2. — P. 21-27. — DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.21-27. [in Russian]