
ПОЖАРНАЯ ТАКТИКА, ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ТУШЕНИЯ

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ СЛЕДОВ ПРОТЕКАНИЯ СВЕРХТОКОВ ПО МЕДНОМУ ПРОВОДНИКУ

И.Д. Чешко, доктор технических наук, профессор;

А.Ю. Мокряк;

С.В. Скодтаев.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Рассмотрен механизм формирования повреждений медного проводника при протекании процесса токовой перегрузки в электросети переменного тока напряжением 220 В. Показано влияние кратности токовой перегрузки на характер сформировавшихся повреждений медного проводника. Показан характер повреждений медного проводника при протекании токов перегрузки разной кратности.

Ключевые слова: судебная пожарно-техническая экспертиза, токовая перегрузка, сверхток, морфологический анализ, оплавления, медный проводник, электропроводка

FORMATION MECHANISM OF EXCESS CURRENTS PASSAGE TRACES IN COPPER CONDUCTORS

I.D. Cheshko; A.Yu. Mokryak; S.V. Skodtaev.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The formation mechanism of copper conductor damages, that occur in the process of current overload at 220 volt alternate current network, was considered. The influence of current overload rate on the copper conductor damages was demonstrated. The character of conductor damages in the process of various rate overload currents passage was demonstrated.

Keywords: forensic fire-technical expertise, current overload, excess current, morphologic analysis, partial melting, copper wire, wiring

При установлении причины пожара исследованию электропроводки на предмет наличия следов протекания аварийных процессов традиционно уделяется особое внимание. Это связано с её потенциальной пожарной опасностью, обусловленной сочетанием в кабельно-проводниковых изделиях горючей среды (электроизоляция, оболочки кабелей и т.п.) и источников зажигания (искры, дуги, нагретые электрическим током детали и т.п.), появляющихся при работе электрооборудования в аварийных режимах. В результате, судя по последним статистическим данным [1], более 25 % пожаров возникают по причине аварийного режима работы электрооборудования. Для выявления признаков пожароопасного аварийного режима работы электросети эксперту необходимо определить природу имеющихся на токоведущих жилах повреждений, в частности, отличить результат

протекания аварийного процесса в электросети от последствий внешнего термического воздействия [2].

Ранее было показано [3], что действие сверхтока при определенных значениях кратности перегрузки может привести к фрагментации (разделению на части медного проводника), а также к появлению на его поверхности характерных следов – утолщений, утончений (шеек) и вздутий. Кроме того, возникают термические поражения жил – протяженные поверхностные зоны оплавления, по внешнему виду схожие с последствиями внешнего теплового воздействия. Описание и количественная оценка данных повреждений приведены в статье «Морфологический анализ медных проводников, подвергшихся воздействию токовой перегрузки, при экспертизе пожаров» [3].

В данной статье изложены предположения авторов о механизме образования утолщений, утончений и фрагментации медных проводников при токовой перегрузке, основанные на результатах моделирования процесса перегрузки.

В качестве образцов для моделирования были выбраны однопроволочные и многопроволочные медные проводники с площадью сечения жилы $2,5 \text{ мм}^2$, в ПВХ-изоляции и без таковой, длина которых составляла 50 см.

Эксперименты проводили на специальном электротехническом стенде при следующих постоянных условиях: напряжение – 220 В переменного тока; температура окружающей среды – $20 \text{ }^\circ\text{C}$; газовый состав окружающей среды – нормальная атмосфера. Закрепленный к контактам образец проводника в изоляции поддерживался снизу подложкой из асбеста. Проводник нагружали токами перегрузки различной кратности – от 4 до 20 крат с шагом в 2 крат. Для медного проводника площадью сечения $2,5 \text{ мм}^2$ номинальным допустимым значением тока является 30 А. Соответственно, в ходе эксперимента проводник подвергали токам перегрузки от 120 до 600 А.

Для фиксации и дальнейшего детального изучения динамики процесса формирования повреждений проводников при различных кратностях тока перегрузки проводилась видеосъемка эксперимента, в режиме макросъемки, на видеокамеру SONY Handycam HDR-PJ810E. Отснятые видеоматериалы в дальнейшем посекундно раскадровывались (25 кадров/сек.) с помощью программного продукта VirtualDub.

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

В ходе проведения экспериментов выяснилось, 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), как правило, не образуются, так как проводник не успевает расплавиться, поскольку время от начала действия сверхтока до момента разрыва (разделения) проводника составляет менее 1–2 сек.

При изучении динамики образования утолщений и утончений на поверхности проводника установлено, что повреждения формируются уже после разрыва, то есть в процессе остывания проводника. На рис. 1, в качестве наглядного примера, приведены фотоснимки проводника в процессе протекания по нему сверхтока с 14-кратной перегрузкой. Как видно из фотоснимков, на 0,6 сек. после разрыва проводника его 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 увеличение 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 из расплавленного металла (жидкой фазы) на поверхности проводника

(твердой фазы) наблюдаемых в последствии утолщений происходит под действием поверхностного натяжения.

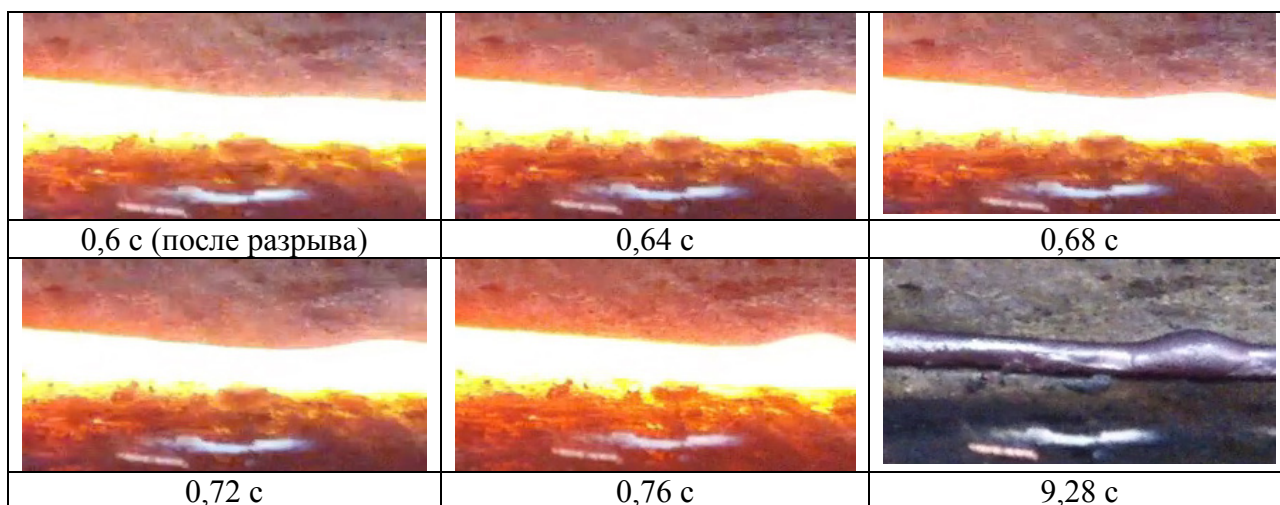


Рис. 1. Формирование дефектов на поверхности медного проводника при токовой перегрузке 14 крат

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 [4].

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 [4].

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, что наблюдается на проводнике (рис. 1). На участке проводника, рядом с местом формирования утолщения, наоборот, за счет оттока жидкой поверхностной фазы происходит уменьшение сечения проводника с образованием утончений – шеек (рис. 2). 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.



Рис. 2. Утолщения и утончения, образовавшиеся на поверхности медного проводника в результате протекания токовой перегрузки кратностью свыше 4÷5

Исходя из результатов проведенных опытов, можно предположить, что при кратности тока перегрузки в диапазоне 12–16 крат разрыв проводника происходит как вследствие расплавления, 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 [5]. При нормальном режиме работы пинч-эффект не возникает, так как сжатию магнитного поля препятствует газокINETическое давление проводящей среды, обусловленное тепловым движением её частиц. Силы этого давления направлены от оси токового канала (рис. 3 а). Однако при достаточно большом токе перепад магнитного давления становится больше газокINETического, вследствие чего токовый канал сжимается, возникает пинч-эффект [5], приводящий к деформации проводящего канала, вплоть до разрушения (рис. 3 б).

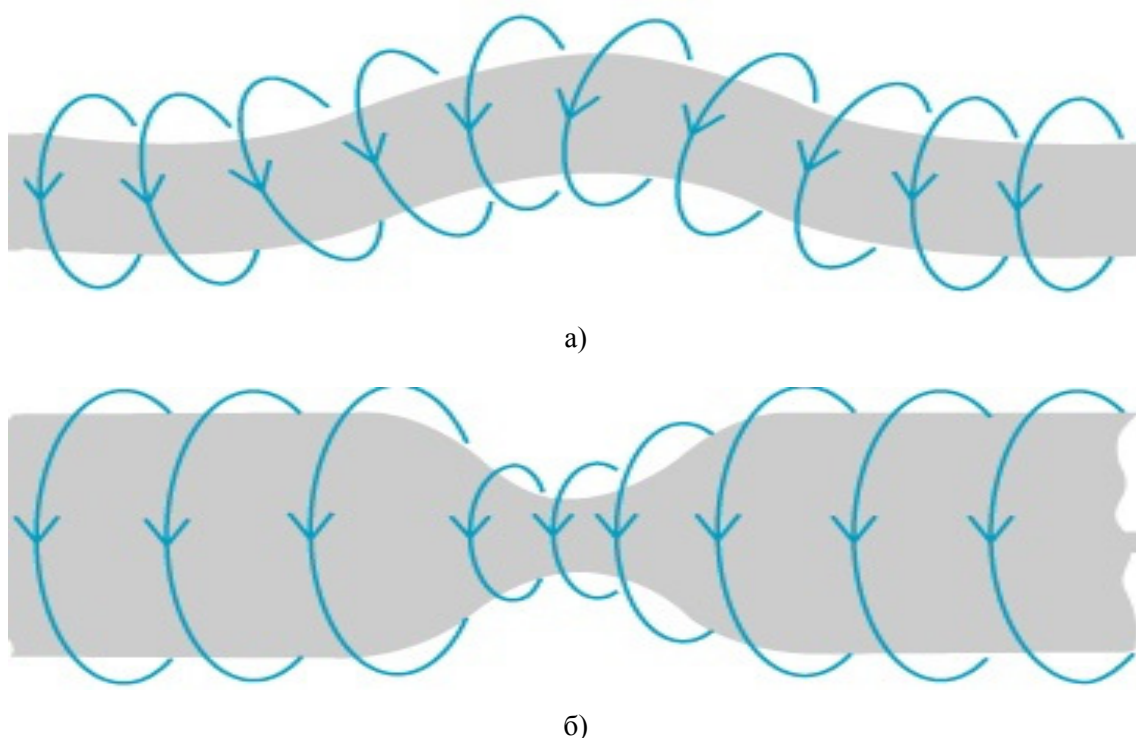


Рис. 3. Действие магнитного поля на токовый канал (проводник):

а) образование магнитного поля при протекании тока по проводнику; б) сжатие токового канала индуцированным магнитным полем, вследствие протекания сверхтока (пинч-эффект)

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, надо полагать, только вследствие пинч-эффекта.

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

Необходимо отметить, что наличие или отсутствие электроизоляционного материала на проводниках не влияет на механизм образования утолщений, утончений и фрагментации.

В табл. 1 приведены фотоснимки, на которых зафиксирован процесс фрагментации 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 описанного процесса образуются несколько отдельных фрагментов, оплавленных 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 [6]. Далее под действием электромагнитных сил происходит разрыв проводника в другом месте.

Таким образом, после первого разрыва проводника электрическая цепь не прерывается, и создаются условия, в которых возможно несколько разрывов и образование нескольких отдельных фрагментов проводника.

Обобщенные данные о механизме формирования повреждений медного проводника в зависимости от кратности токовой перегрузки приведены в табл. 2.

Таблица 1. Разрыв медного проводника диаметром 2,5 мм² в нескольких точках в ходе токовой перегрузки 14 крат (пунктиром отмечены участки разделения проводника)






Фотоснимок	Время, с
	0,0
	0,16
	0,28
	0,4
	2,32

Таблица 2. Механизм формирования повреждений медного проводника в зависимости от кратности токовой перегрузки

Кратность перегрузки	Механизм формирования повреждений	
	плавление	пинч-эффект
4–12	+	–
12–16	+	+
16–∞	–	+

Исходя из результатов изучения динамики разрушения проводника и проведенного морфологического анализа полученных образцов, описан механизм образования утолщений, утончений и фрагментации медных проводников при пожароопасных аварийных режимах в электросети. Установлены следующие закономерности формирования повреждений медного проводника в зависимости от кратности токовой перегрузки:

- при кратности токовой перегрузки от 4 до 16 разрыв проводника происходит в результате плавления проводника, а также под действием сил поверхностного натяжения на медном проводнике образуются утолщения и утончения – шейки;

- при кратности токовой перегрузки от 12 и выше разрыв проводника происходит в результате пинч-эффекта, также может происходить разделение проводника на несколько частей – фрагментация;

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

- наличие или отсутствие электроизоляционного материала на проводниках не влияет на механизм образования утолщений, утончений и фрагментации.

Указанные закономерности необходимо учитывать при установлении природы электрического аварийного режима работы электрооборудования и его причастности к возникновению пожара.

Литература

1. Статистические данные о пожарах и последствиях от них по субъектам Российской Федерации за 2013 г. URL: <http://www.mchs.gov.ru> (дата обращения: 20.12.2014).
2. Смелков Г.И. Пожарная опасность электропроводок при аварийных режимах. М.: Энергоатомиздат, 1984. 184 с.
3. Мокряк А.Ю., Чешко И.Д. Морфологический анализ медных проводников, подвергшихся воздействию токовой перегрузки, при экспертизе пожаров // Проблемы управления рисками в техносфере. 2014. № 4 (32). С. 41–49.
4. Семенченко В.К. Поверхностные явления в металлах и сплавах. М.: Гостехиздат, 1957. 491 с.
5. Арцимович Л.А. 7.4 Пинч-эффект // Элементарная физика плазмы. М.: Атомиздат, 1969. 189 с.
6. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. 2-е изд. М.: Наука, 1992. 536 с.