https://doi.org/10.22227/PVB.2020.29.06.50-60
УДК 656.13;614.84

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

О некоторых параметрах короткого замыкания в автомобильной электрической сети напряжением 12 В

© **А.И. Недобитков** ✉

Восточно-Казахстанский государственный технический университет имени Д. Серикбаева
(Республика Казахстан, 070014, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 19)

АННОТАЦИЯ

Введение. Приведенные в статье данные свидетельствуют о том, что проблема дифференциации первичного и вторичного короткого замыкания очень актуальна. Целью статьи является разработка научно-обоснованного метода исследования медного проводника автомобильной электрической сети, имеющего признаки короткого замыкания, для установления причины его повреждения в ходе пожарно-технической экспертизы.
Материалы и методика. Исследования проводились с использованием растрового электронного микроскопа JSM-6390LV с приставкой для энергодисперсионного микроанализа, микротвердомера DuraScan 20, инфракрасного тепловизора Fluke Ti400.
Результаты и обсуждение. Экспериментально доказано, что микротвердость медного проводника, подвергнутого первичному короткому замыканию, отличается от значений микротвердости медных проводников, подвергшихся токовой перегрузке или внешнему высокотемпературному воздействию. Приведены снимки участков измерения микротвердости медного проводника, подвергшегося первичному короткому замыканию. Даны результаты энергодисперсионного анализа и характерные диагностические признаки, позволяющие установить причину повреждения медного проводника при пожаре (первичное или вторичное короткое замыкание). Измерена температура медного проводника при искровом и дуговом протекании короткого замыкания. Экспериментально подтверждена возможность применения расчетного метода определения температуры проводника при коротком замыкании.
Выводы. Предложен метод дифференциации первичного или вторичного короткого замыкания медного проводника автомобильной электрической сети. Показано, что метод измерения микротвердости может быть использован в качестве вспомогательного для метода растровой микроскопии. Приведенные в статье результаты могут быть использованы специалистами при исследовании медных проводников, изымаемых из сгоревших транспортных средств, в целях установления механизма их повреждения и, в конечном счете, причины пожара автомобиля.

Ключевые слова: пожар; медный проводник; растровая электронная микроскопия; микротвердомер; пожарно-техническая экспертиза

Для цитирования: *Недобитков А.И.* О некоторых параметрах короткого замыкания в автомобильной электрической сети напряжением 12 В // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 6. С. 50–60. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.50-60

✉ *Недобитков Александр Игнатьевич*, e-mail: a.nedobitkov@mail.ru

On specific short circuit parameters of 12 V automobile electric systems

© **Alexandr I. Nedobitkov** ✉

D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University
(Serikbayeva St., 19, Ust-Kamenogorsk, 070014, Republic of Kazakhstan)

ABSTRACT

Introduction. The data presented in the article show that the problem of differentiating primary and secondary short circuits is very important. The purpose of the article is to develop a scientifically grounded research method for copper conductors of automobile electric systems showing signs of a short circuit to identify the cause of its damage in a fire investigation.
Materials and methods. The research was conducted with the help of JSM-6390LV scanning electron microscope having an energy dispersive microanalysis unit attached, DuraScan 20 microhardness tester, and Fluke Ti400 infrared thermal imager.
Results and discussion. It is experimentally proven that the microhardness of a copper conductor subjected to a primary short circuit differs from that of a copper conductor subjected to an overcurrent or external high temperature. Images of microhardness measurement areas of a copper conductor subjected to a primary short

circuit are provided. The results of an energy dispersive analysis and characteristic diagnostic features allowing to establish the cause of the copper conductor damage in case of fire (primary or secondary short circuit) are provided. The temperature of the copper conductor is measured for short circuits that entail sparking and an arc. The applicability of the computational method for determining the conductor temperature in the event of a short circuit is experimentally proved.

Conclusions. A differentiation method is proposed for telling primary short circuits from secondary ones arising in copper conductors of automobile electrical systems. It is shown that the microhardness testing method can supplement the scanning electron microscopy method. The results provided in the article can be used by specialists to study copper conductors extracted from burned vehicles in order to identify the mechanism of their damage and, eventually, the cause of the car fire.

Keywords: fire; copper conductor; scanning electron microscopy; microhardness tester; fire investigation

For citation: Nedobitkov A.I. On specific short circuit parameters of 12v automobile electric systems. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(6):50-60. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.06.50-60 (rus).

✉ *Alexandr Ignatyevich Nedobitkov*, e-mail: a.nedobitkov@mail.ru

Введение

В работах [1–3] наглядно проиллюстрировано, что пожары, являясь тяжелой чрезвычайной ситуацией (ЧС), наносят значительный ущерб экономике государств, при этом пожары на автотранспортных средствах относятся к особо тяжелым ЧС.

Авторами [4–13] приведены убедительные доказательства того, что ряд элементов электрической сети автомобиля может служить источником возгорания в случае возникновения аварийного режима в какой-либо функциональной цепи.

В работе [14] отмечается, что в судебной пожарно-технической экспертизе методика установления первичности-вторичности короткого замыкания (КЗ) относится наряду с методикой обнаружения остатков интенсификаторов горения (средств поджога) к наиболее востребованной. И причина этого очевидна: так называемая электротехническая версия возникновения пожара рассматривается практически на каждом электрифицированном объекте [14].

В настоящее время для исследования оплавлений медных проводников, изымаемых с мест пожаров, применяются следующие методы: определение причины разрушения по внешним признакам (морфологическое исследование), рентгеноструктурный анализ (РСА), металлографический анализ [7, 15–21], растровая микроскопия [10, 11, 13].

Необходимо отметить, что в работе [22] указано на определенные сложности применения металлографии, при этом дословно сказано: «Имеется полная неопределенность, связанная с выбором места на шлифе, которое подлежит исследованию; на одном и том же шлифе объектив микроскопа может найти сколько угодно мест, которые на 100 % подтверждают первичность КЗ, а чуть передвинув шлиф, с не меньшей точностью можно найти все признаки вторичного КЗ».

Автором [23] указывается на изменения структуры оплавлений медных проводников от внешнего высокотемпературного воздействия при развитии пожара. В работе [24] предпринята попытка определения оптимального сечения оплавления медного проводника для изготовления шлифа, но проблема не решена, поскольку при пожаре на проводник действует большое число факторов, вызывающих многообразие структур в меди [13, 23]. Например, в работе [14] подчеркивается, что содержание кислорода не может выступать в качестве надежного критерия определения первичности-вторичности КЗ, поскольку на этот параметр оказывает влияние не только газовый состав окружающей атмосферы, но и, в частности, длительность электродугового процесса. Само по себе наличие дендритных структур также не коррелирует, судя по проведенным экспериментам, с условиями, характерными для первичного КЗ [14]. В свою очередь, в диссертационных работах [10, 11] приведены убедительные доказательства, что метод РСА не применим при исследовании оплавлений медных проводников, вызванных токовой перегрузкой. Также в работе [7] на основе обработки экспериментальных данных получен вывод о том, что с помощью метода РСА установление первичности или вторичности короткого замыкания в автомобильной электрической сети не представляется возможным. Объемные экспериментальные исследования, выполненные авторами [25], наглядно иллюстрируют, что применяемые в настоящее время такие методы исследования оплавлений медных проводников, как морфологическое исследование, РСА, металлографический анализ, не дают однозначного результата. Анализируя эволюцию развития методик экспертного исследования оплавлений медных проводников, к подобному выводу приходят авторы [26], категорично заявляя, что методические материалы Министерства внутренних дел Российской Федерации (РФ) и Министерства по чрезвычайным ситуациям РФ по установлению признаков первичности-вторичности КЗ несовершенны и требуют существенной доработки, а их использование в судебных пожарно-технических экспертизах — нецелесообразно.

Целью данной работы является разработка научно-обоснованного метода исследования медных проводников автомобильной электрической сети с напряжением 12 В, оплавленных в результате короткого замыкания, для установления причины их повреждения в ходе пожарно-технической экспертизы.

Исходя из этого, были поставлены следующие задачи исследования:

- на современном уровне автомобилестроения подтвердить, что короткие замыкания в проводах малых сечений (0,5…1,5 мм^2) самоликвидируются и редко приводят к возникновению очага возгорания;
- экспериментально показать, что короткое замыкание в автомобильной электрической сети напряжением 12 В протекает в искровом режиме и полностью соответствует закону Пашена;
- экспериментально подтвердить, что короткое замыкание в автомобильной электрической сети напряжением 12 В при возникновении дуги возможно только при наличии между проводником и кузовной деталью токопроводящего карбонизированного фрагмента;
- наглядно проиллюстрировать, что расчетная формула для определения температуры проводника, нагреваемого током короткого замыкания по ГОСТ 12.1.004–91[1], соответствует экспериментальным данным моделирования короткого замыкания в автомобильной электрической сети напряжением 12 В;
- показать, что процессы, происходящие в медном проводнике при коротком замыкании, приводят к изменению его структуры;
- экспериментально доказать, что изменение структуры медного проводника при коротком замыкании может быть зафиксировано с помощью метода измерения микротвердости.

Материалы и методы исследования

Исследования выполнены в Центре превосходства «Veritas» Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева на растровом электронном микроскопе JSM-6390LV с приставкой для энергодисперсионного микроанализа, а также на микротвердомере DuraScan 20. Для измерения температуры проводника в процессе короткого замыкания применялся тепловизор Fluke Ti400. Испытаниям подвергались образцы многопроволочных проводников сечением от 1,5 до 4,9 мм^2. Короткое замыкание моделировалось на учебной установке, включающей двигатель ВАЗ-21083 с тормозной машиной (рис. 1, *a*). Двигатель оснащен аккумуляторной батареей 6СТ62 и генератором ВАЗ-2108-2115, 2170 14В 80А КЗАТЭ.

a

b

Рис. 1. Общий вид: *a* — экспериментальная установка; *b* — образец медного проводника для определения микротвердости

Fig. 1. The overview: *a* — an experimental unit; *b* — a copper conductor sample designated for microhardness testing

Кузовную деталь автомобиля имитировала стальная лента размером 52 × 20 × 0,8 мм. К отрицательному выводу аккумуляторной батареи посредством многопроволочного медного провода подключалась стальная лента, а к положительному — провод, замыкающий накоротко электрическую цепь. Для определения параметров микротвердости были изготовлены аншлифы медных проволочек (рис. 1, *b*). Все образцы запрессовывались в фенольную смолу с наполнителем из древесной муки с массовой долей золы до 1 % и подвергались шлифовке, при этом многопроволочные проводники разделялись на отдельные проволочки (см. рис. 1, *b*). Измерения выполнялись с соблюдением общих требований ГОСТ 9450–76[2].

[1] ГОСТ 12.1.004–91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 14 июня 1991 г. № 875.

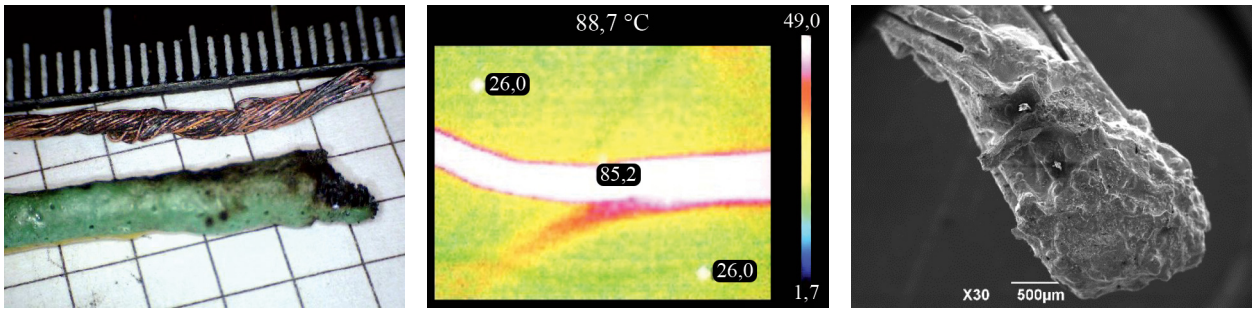
[2] ГОСТ 9450–76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 09 января 1976 г. № 68.

Результаты и их обсуждение

В работе [27] экспериментально доказано, что если между кузовной деталью автомобиля и проводником имеется воздушный зазор, равный толщине изоляции этого проводника, то короткого замыкания не произойдет. Авторами [28] при анализе причин пожаров автотранспортных средств дана ссылка на закон Пашена, согласно которому электрическая дуга при обычном атмосферном давлении и напряжении 12 В возникнуть не может. В частности, в работе [28] отмечается, что закон Пашена описывает взаимосвязь между напряжением и образованием устойчивой электрической дуги при условии наличия достаточного тока при сближении двух электродов. В неионизированном воздухе и при комнатной температуре это минимальное напряжение, необходимое для образования дуги, также называемое напряжением пробоя, рассчитано как 340 В для зазора размером 0,007 мм (0,00027 дюйма) [28]. Таким образом, первичное короткое замыкание в автомобильной электрической сети напряжением 12 В может протекать только в искровом режиме при контакте оголенного медного проводника с очищенной от лакокрасочного покрытия кузовной деталью.

Результаты эксперимента по имитации короткого замыкания приведены на рис. 2, 3. При этом необходимо отметить, что в промежутке времени от 1 до 4 с искрового короткого замыкания температура изоляции проводника не превышает 88,7 °С, и она не воспламеняется (рис. 2, *а*). Обугливание изоляции отмечается только непосредственно в области короткого замыкания. Температура самого медного проводника в указанный интервал времени в зоне искрения не превышает 192,5 °С.

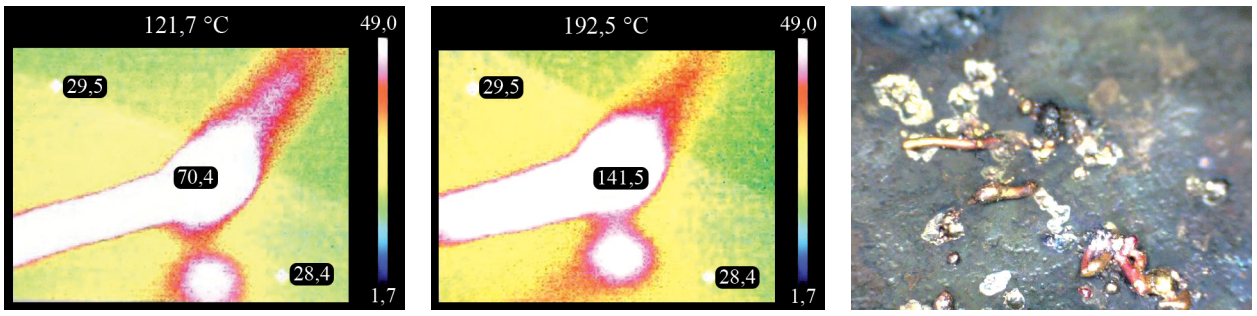
Эксперимент также подтвердил вывод авторов [29], согласно которому короткие замыкания в проводах малых сечений (0,5…1,5 мм^2) самоликвидируются и редко приводят к возникновению очага возгорания. При этом процесс самоликвидации протекает в двух формах: в первом случае, как показано в работе [27], в непосредственной близости от места залипания по терминологии [7] происходило разрушение проволок медного проводника с характерными признаками токовой перегрузки; во втором случае проволоки разрушались в месте



a *b* *c*

Рис. 2. Результаты эксперимента по имитации короткого замыкания: *а* — состояние изоляционного покрытия проводника; *b* — температура проводника; *с* — оплавление медного многопроволочного проводника, увеличение 30^X

Fig. 2. Short circuit imitation experiment results: *a* — the condition of the conductor insulation; *b* — conductor temperature; *c* — multiwire copper conductor melting, 30^X magnification



a *b* *c*

Рис. 3. Результаты эксперимента по имитации короткого замыкания: *а* — температура проводника на третьей секунде эксперимента; *b* — температура проводника на четвертой секунде эксперимента; *с* — разрушение проволочек в области контакта

Fig. 3. Short circuit imitation experiment results: *a* — the conductor temperature during the third second of the experiment; *b* — the conductor temperature during the fourth second of the experiment; *c* — wire destruction in the contact area

контакта (рис. 3, *c*). Поскольку подача медной проволоки в зону короткого замыкания не происходит, то оно самоликвидируется. Следует отметить, что, несмотря на высокую температуру искры, ее воспламеняющая способность сравнительно невысока, так как из-за малых размеров (массы) запас тепловой энергии искры очень мал. Искры способны воспламенить парогазовоздушные смеси, имеющие малый период индукции, небольшую минимальную энергию зажигания и отсутствующие в технически исправном автомобиле. Необходимо напомнить, что ГОСТ 12.1.004–91 рекомендует для определения температуры проводника, нагреваемого током короткого замыкания, следующую формулу:

$$t_{\text{пр}} = t_{\text{н}} + \frac{I_{\text{к.з}}^2 R \tau_{\text{к.з}}}{C_{\text{пр}} m_{\text{пр}}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{н}}$ — начальная температура проводника, °С;

$I_{\text{к.з}}$ — ток короткого замыкания, А;

R — сопротивление проводника, Ом;

$\tau_{\text{к.з}}$ — время короткого замыкания, с;

$C_{\text{пр}}$ — теплоемкость проводника, Дж/(кг·К);

$m_{\text{пр}}$ — масса проводника, кг.

В свою очередь, сопротивление проводника определяется по формуле:

$$R = \rho l / s, \quad (2)$$

где ρ — удельное сопротивление, Ом · м^2;

l — длина проводника, м;

S — площадь поперечного сечения проводника, м^2.

Следует указать, что в интервале величины тока короткого замыкания 60…100 А расчет по формуле дает результаты, близкие к экспериментальным. В качестве массы проводника необходимо принимать массу жгута проводов, в котором произошло короткое замыкание. В свою очередь, длина проводника равна длине жгута проводов, в котором произошло короткое замыкание. Нижняя граница интервала тока короткого замыкания обоснована в работе [7], верхняя граница определяется конструктивными параметрами легковых автомобилей. Необходимо отметить, что у всех современных легковых автомобилей в электрической цепи сразу за аккумуляторной батареей (АКБ) имеется силовой предохранитель номиналом 120…250 А в зависимости от емкости АКБ. Далее, в блоке предохранителей моторного отсека имеется силовой предохранитель типа ALT номиналом 60…100 А в зависимости от конструкции автомобиля. Таким образом, в электрических цепях за блоком предохранителей моторного отсека сила тока конструктивно не может превышать 100 А. Формула (1) может использоваться для проверочного расчета при обосновании версии о причастности того или иного жгута проводов к возникновению пожара автомобиля.

Ряд авторов [28], в том числе специалисты АО «АВТОВАЗ», встречали в своей практике сквозные повреждения деталей кузова автомобиля, обусловленные электродуговым процессом. Авторами [28] даны следующие варианты возникновения дуги. Первый вариант основан на стандарте NFPA®921[3], в котором дается следующее объяснение возникновения дуги: «Изоляция проводов при воздействии прямого пламени или лучистого тепла может быть обуглена и начнет действовать, как полупроводящая среда», т.е. карбонизированный токопроводящий элемент замыкает цепь и вызывает дугу. Второй вариант отсылает к исследованию, проведенному Научно-исследовательским институтом пожарных автомобилей. Согласно этому исследованию, в изоляции жгута проводов под действием электрического тока происходит трансформация углеводородов в углерод, который является хорошим проводником. По прошествии значительного времени (например, 10–15 лет эксплуатации автомобиля) этот нагар может увеличиться в такой степени, что не станет способен проводить большой ток, который и вызовет электродуговой процесс [28]. Авторами работы [28] также отмечается, что продолжительность дуги в цепи постоянного тока зависит от подачи питания и зазора в контакте, поскольку дуга имеет тенденцию быстро разрушать металлические электроды, увеличивая зазор, который гасит дугу.

Для имитации такого режима дуги в рамках настоящего исследования в зазор между многопроволочным медным проводником и металлической пластиной, имитирующей кузовную деталь, был помещен фрагмент угольнографитовой щетки электродвигателя. В связи с этим необходимо напомнить, что известна дуговая сварка угольным электродом или способ Бенардоса, который принципиально отличается от сварки металлическим электродом. При дуговой сварке угольным электродом дуга горит между свариваемыми элементами и электродом. Электрод в этом случае является только проводником электричества, присадочный же металл по мере надобности вводится в сварочную ванну дополнительно. Сварку меди угольной дугой выполняют только с применением постоянного тока на прямой полярности (положительный полюс машины присоединяется к изделию, а отрицательный — к электроду). Сварка меди угольной дугой на обратной полярности не выполняется, так как в этом случае дуга горит неустойчиво и происходит быстрое сгорание угольного (графитового) электрода.

Результаты эксперимента приведены на рис. 4. На второй секунде возникновения дуги температура проводника достигла 201,6 °С, от токовой перегрузки начала плавиться изоляция одновременно

[3] NFPA®921. Guide for fire and explosion investigations.

a *b* *c*

Рис. 4. Результаты эксперимента по моделированию электрической дуги: *a* — температура проводника; *b* — кратер на контактной поверхности, увеличение 5^X; *c* — кратер, увеличение 30^X

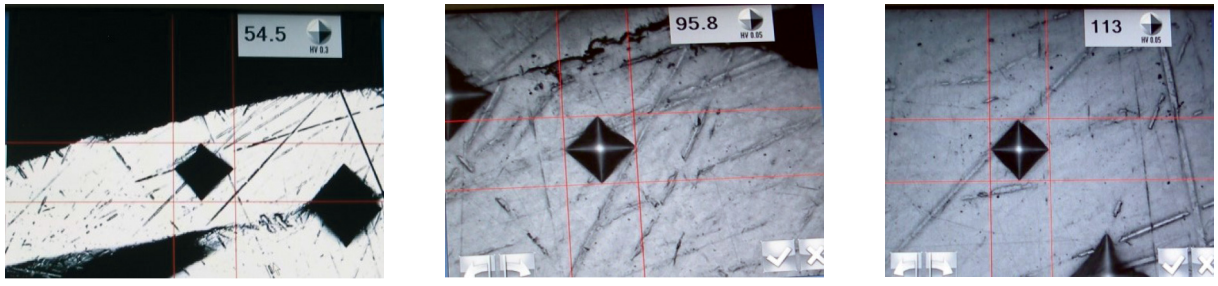
Fig. 4. Results of an electric arc modeling experiment: *a* — conductor temperature; *b* — contact surface crater, 5^X magnification; *c* — crater, 30^X magnification

на всем протяжении проводника. Поскольку фрагмент угольнографитовой щетки электродвигателя имел размеры, сопоставимые с сечением проводника, то на третьей секунде он полностью выгорел, и дуга исчезла. На поверхности металлической пластины отмечается кратер с дуговыми наплывами металла и трещиной на дне (рис. 4, *b*, *c*). Необходимо отметить, что при искровом протекании короткого замыкания также может появляться кратер, но дуговые наплывы в нем не образуются [27].

Таким образом, поскольку у автомобильной электрической сети имеется обратная полярность, то вторичное короткое замыкание, сопровождаемое дугой, кратковременно и самоликвидируется в процессе выгорания карбонизированного токопроводящего фрагмента, переходя в искровую стадию.

На рис. 5 приведены результаты измерения микротвердости многопроволочных медных проводников, оплавленных в результате короткого замыкания.

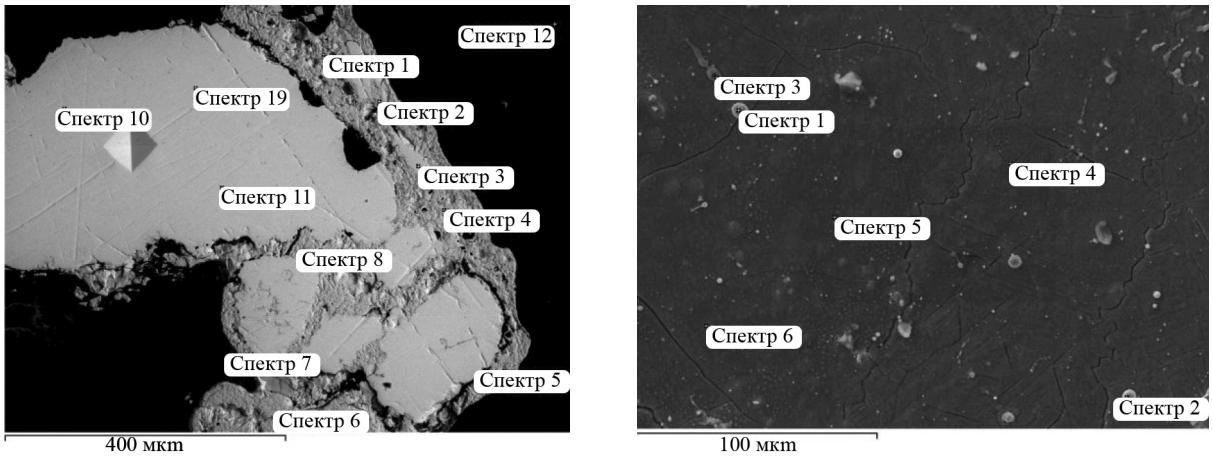
Согласно справочным данным, микротвердость исходного образца твердой холоднокатаной электротехнической меди М1Е составляет около 95 МПа. В областях сплавления проволок проводника микротвердость снижается до уровня HV54,5, в непосредственной близости от зон сплавления микротвердость близка к начальному уровню HV95,8, а на удалении около 1 см от зоны оплавления микротвердость проволочек повышается и может достигать значения HV113 (см. рис. 5). Снижение микротвердости в области сплавления проволок объясняется наличием пор и раковин, увеличение же микротвердости вызвано двумя одновременно действующими факторами. Во-первых, в работе [30] указывается, что значительное (до 2,0…3,2 ГПа) увеличение микротвердости является результатом механического легирования меди кислородом на этапе механической активации с образованием частиц оксидов и результирующим подавлением явления динамической рекристаллизации и других процессов релаксации, формирующихся при деформации высокодефектных наноструктурных состояний. Во-вторых, в работе [31] установлено, что, независимо от исследованных значений индукции магнитного поля после удаления из него образца, микротвердость увеличивается на величину, зависящую от времени выдержки и индукции магнитного поля. Таким образом, увеличение микротвердости является одним из характерных признаков короткого замыкания.



a *b* *c*

Рис. 5. Результаты измерения микротвердости: *a* — на участке сплавления проволок; *b* — на участке вблизи сплавления проволок; *c* — на участке, удаленном от оплавления медного многопроволочного проводника

Fig. 5. Microhardness testing results: *a* — in the wire fusion area; *b* — in the area adjacent to the wire fusion; *c* — at a distance from the multiwire copper conductor melting area



a *b*

Рис. 6. Точки проведения энергодисперсионного анализа: *a* — участок оплавления многопроволочного медного проводника; *b* — дно кратера на контактной поверхности

Fig. 6. Energy dispersive analysis points: *a* — multiwire copper conductor melting area; *b* — crater bottom on the contact surface

На рис. 6 показаны точки проведения энергодисперсионного анализа зоны оплавления медного многопроволочного проводника (рис. 6, *a*) и дна кратера, образованного дугой (рис. 6, *b*).

В табл. 1 и 2 приведены результаты энергодисперсионного анализа. Из данных табл. 1 следует, что на участках оплавления и сплавления проволок многопроволочного проводника (точки измерения 1–8) содержание кислорода изменяется в диапазоне 14,27…20,67 %. На неповрежденных участках (точки измерения 9–11) содержание кислорода составляет 6,38…11,05 %, что подтверждает данные работы [30] и свидетельствует об изменении структуры меди. Наличие железа предполагает массоперенос при протекании процесса короткого замыкания. Присутствие Mg, Si, Ca объясняется переносом материала при шлифовке образца.

Из данных табл. 2 следует, что поверхность кратера покрыта конденсировавшимися частицами паров меди, образовавшимися при имитации дугового процесса с угольнографитовым электродом. Из сравнения рис. 3, *c* и рис. 6, *b* следует вывод о криминалистически значимом признаке, позволяющем различать искровое и дуговое протекание короткого замыкания.

Таблица 1. Результаты микроанализа участка, показанного на рис. 6, *a*

Table 1. The microanalysis of the area shown in Fig. 6, *a*

Точки измерения Measurement point	Содержание химического элемента, % мас. Chemical element content, mass percent						
	O	Mg	Al	Si	Fe	Cu	Ca
Спектр 1 / Range 1	14,27	—	—	—	1,40	82,75	1,58
Спектр 2 / Range 2	16,76	—	—	0,66	0,90	80,12	1,56
Спектр 3 / Range 3	14,23	—	0,95	—	—	82,50	2,32
Спектр 4 / Range 4	17,89	—	—	0,96	1.63	76,54	2,97
Спектр 5 / Range 5	20,18	—	—	—	2,00	75,06	2,76
Спектр 6 / Range 6	20,67	—	—	—	—	77,60	1,73
Спектр 7 / Range 7	18,50	—	—	—	—	80,20	1,30
Спектр 8 / Range 8	16,52	—	—	—	—	80,74	2,74
Спектр 9 / Range 9	6,95	—	—	—	—	92,13	0,92
Спектр 10 / Range 10	6,38	—	—	—	—	92,60	1,02
Спектр 11 / Range 11	11,05	—	—	—	—	87,23	1,72
Спектр 12 / Range 12	70,18	1,65	—	2,35	—	9,34	14,25

Таблица 2. Результаты микроанализа участка, показанного на рис. 6, *b*
Table 2. The microanalysis of the area shown in Fig. 6, *b*

Точки измерения Measurement points	Содержание химического элемента, % мас. Chemical element content, mass percent			
	O	Cl	Fe	Cu
Спектр 1 / Range 1	7,52	0,94	76,71	14,84
Спектр 2 / Range 2	31,03	0,63	52,50	15,84
Спектр 3 / Range 3	8,90	—	86,34	4,76
Спектр 4 / Range 4	23,83	—	74,38	1,79
Спектр 5 / Range 5	24,30	0,62	73,28	1,80
Спектр 6 / Range 6	25,26	0,67	71,25	2,81

Выводы

Экспериментально подтверждено, что короткие замыкания в проводах малых сечений (0,5…1,5 мм^2) в автомобильной электрической сети напряжением 12 В самоликвидируются и редко приводят к возникновению очага возгорания.

Наглядно показано, что короткое замыкание в автомобильной электрической сети напряжением 12 В протекает в искровом режиме и полностью соответствует закону Пашена.

Опытным путем доказано, что возникновение дуги при коротком замыкании в автомобильной электрической сети напряжением 12 В возможно только при наличии между проводником и кузовной деталью токопроводящего карбонизированного фрагмента, что соответствует вторичному короткому замыканию.

Наглядно проиллюстрировано, что расчетная формула для определения температуры проводника, нагреваемого током короткого замыкания, по ГОСТ 12.1.004–91 дает результаты, близкие к экспериментальным данным моделирования короткого замыкания в автомобильной электрической сети напряжением 12 В.

Показано, что процессы, происходящие в медном проводнике при коротком замыкании, приводят к изменению его структуры, что может быть зафиксировано с помощью метода измерения микротвердости.

Продемонстрировано, что метод измерения микротвердости может быть использован при исследовании фрагментов медных проводников в качестве вспомогательного к основному методу исследования — растровой микроскопии.

Полученные результаты могут быть использованы при экспертном исследовании фрагментов медных проводников, изымаемых из сгоревших транспортных средств в целях установления причины пожара, что позволит разработать профилактические мероприятия или технические решения, направленные на ее устранение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Брушлинский Н.Н., Соколов С.В.* Какова «стоимость» пожаров в современном мире? // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 1. С. 79–88. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.79-88
2. *Quintiere J.G.* Fundamentals of fire phenomena. England, Chichester : John Wiley and Sons Ltd, 2006. DOI: 10.1002/0470091150.fmatter
3. *Beyler C., Carpenter D., Dinenno P.* Introduction to fire modeling // Fire Protection Handbook. 20th ed. Quincy : National Fire Protection Association, 2008.
4. *Severy D.M., Blaisdell D.M., Kerkhoff J.F.* Automotive collision fires // SAE Technical Paper. 1974. DOI: 10.4271/741180
5. *Katsuhiro Okamoto, Norimichi Watanabe, Yasuaki Hagimoto, Tadaomi Chigira, Ryoji Masano, Hitoshi Miura et al.* Burning behavior of sedan passenger cars // Fire Safety Journal. 2009. Vol. 44. No. 3. Pp. 301–310. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.07.001
6. *Чешко И.Д., Скодтаев С.В., Теплякова Т.Д.* Классификация аварийных пожароопасных режимов работы электросетей автомобилей и схема выявления их следов после пожара // Проблемы управления рисками в техносфере. 2019. № 1 (49). С. 107–115.
7. *Богатищев А.И.* Комплексные исследования пожароопасных режимов в сетях электрооборудования автотранспортных средств : дис. … канд. техн. наук. М. : Академия ГПС МЧС России, 2002. 269 с.

8. *Чешко И.Д.* Экспертиза пожаров (объекты, методы, методики исследования). 2-е изд., стереотип. СПб. : СПб ИПБ МВД РФ, 1997. 562 с.
9. *Чешко И.Д., Мокряк А.Ю., Скодтаев С.В.* Механизм формирования следов протекания сверхтоков по медному проводнику // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2015. № 1. С. 41–46. URL: https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V71/7.pdf
10. *Мокряк А.Ю.* Установление природы оплавлений медных проводников и латунных токоведущих изделий при экспертизе пожаров на объектах энергетики : дис. … канд. техн. наук. М. : Академия ГПС МЧС России, 2018. 140 с.
11. *Скодтаев С.В.* Механизм и морфологические признаки аварийных пожароопасных процессов в электросетях автомобилей : дис. … канд. техн. наук. М. : Академия ГПС МЧС России, 2019. 144 с.
12. *Смелков Г.И., Чешко И.Д., Плотников В.Г.* Экспериментальное моделирование пожароопасных аварийных режимов в электрических проводах // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2017. № 3. С. 121–128. DOI: 10.24411/2218-130X-2017-00016
13. *Недобитков А.И.* Исследование микротвердости медного проводника автомобильной электрической сети, подвергшегося токовой перегрузке // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 2. С. 17–25. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.02.17-25
14. *Чешко И.Д., Мокряк А.Ю., Мокряк А.В.* Эволюция методики определения первичности-вторичности оплавлений медных проводников, вызванных коротким замыканием // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2018. № 3. С. 39–45. DOI: 10.24411/2218-130X-2018-00047
15. *Delplace M., Vos E.* Electric short circuits help the investigator determine where the fire started // Fire Technology. 1983. Vol. 19. No. 3. Pp. 185–191. DOI: 10.1007/bf02378698
16. *Wright S.A., Loud J.D., Blanchard R.A*. Globules and beads: what do they indicate about small-diameter copper conductors that have been through a fire? // Fire Technology. 2015. Vol. 51. No. 5. Pp. 1051–1070. DOI: 10.1007/s10694-014-0455-9
17. *Babrauskas V.* Arc mapping: a critical review // Fire Technology. 2018. Vol. 54. Issue 3. Pp. 749–780. DOI: 10.1007/s10694-018-0711-5
18. *Hoffmann D.J., Swonder E.M., Burr M.T.* Arc faulting in household appliances subjected to a fire test // Fire Technology. 2016. Vol. 52. Issue 6. Pp. 1659–1666. DOI: 10.1007/s10694-015-0556-0
19. *Kuan-Heng Liu, Yung-Hui Shih, Guo-Ju Chen, Jaw-Min Chou.* Microstructural study on oxygen permeated arc beads // Journal of Nanomaterials. 2015. Pp. 1–8. DOI: 10.1155/2015/373861
20. *Murray I., Ajersch F.* New metallurgical techniques applied to fire investigation // Fire & Materials ‘2009. London, Interscience Communications Ltd., 2009. Pp. 857–869.
21. *Carey N.J.* Developing a reliable systematic analysis for arc fault mapping : Ph. D. Diss. Strathclyde, United Kingdom : University of Strathclyde, 2009.
22. *Смелков Г.И.* Пожарная безопасность электропроводок. М. : ООО «Кабель», 2009. 327 с.
23. *Lewis K.H., Templeton B.* Morphological variation in copper arcs during post-arc fire heating // Proceedings of 3rd International Symposium on Fire Investigation Science & Technology. Sarasota : National Association of Fire Investigators, 2008. Pp. 183–195.
24. *Сысоева Т.П., Моторыгин Ю.Д.* Особенности расположения дендритных структур в оплавлениях медных проводников на транспортных средствах // Проблемы управления рисками в техносфере. 2014. № 4. С. 34–41.
25. *Roby R.J., McAllister J.* Final technical report for award No. 2010-DN-BX-K246: Forensic investigation techniques for inspecting electrical conductors involved in fire. Columbia : Combustion Science & Engineering, Inc., 2012. URL: https://www.ncjrs.gov/pdffiles1/nij/grants/239052.pdf
26. *Таубкин И.С., Саклантий А.Р.* О методических материалах по установлению причинно-следственной связи между аварийными режимами в электропроводке с медными проводниками и возникновением пожара // Теория и практика судебной экспертизы. 2018. Т. 13. № 3. С. 38–46. DOI: 10.30764/1819-2785-2018-13-3-38-46
27. *Недобитков А.И.* Особенности короткого замыкания в автомобильной электрической сети // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2018. Т. 27. № 5. С. 34–49. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.05.34-49
28. *Parrott K.D., Stahl D.R.* Electrical arcs and sparks: A literature review of definitions and their implications in the analysis of 12 volt direct current electrical system fires // International

Symposium on Fire Investigation Science & Technology (ISFI), 2014. URL: https://es.stahl-engineering.com/post/electrical-arcs-and-sparks-12-volt-direct-current-electrical-system-fires
29. *Исхаков Х.И., Пахомов А.В., Каминский Я.Н.* Пожарная безопасность автомобиля. М. : Транспорт, 1987. 87 с.
30. *Дитенберг И.А., Денисов К.И., Тюменцев А.Н., Корчагин М.А., Корзников А.В.* Особенности микроструктуры и закономерности упрочнения меди при механической активации и кручении на наковальнях Бриджмена // Физическая мезомеханика. 2013. Т. 16. № 6. С. 81–87.
31. *Загуляев Д.В., Яропо лова Н.Г., Комиссарова И.А., Коновалов С.В., Громов В.Е.* Закономерности изменения микротвердости меди после магнитной обработки // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2013. Т. 10. № 2. С. 261–265. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18910335

REFERENCES

1. Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V. How much is the fire “cost” in the modern world? *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(1):79-88. DOI:10.18322/PVB.2020.29.01.79-88 (rus.).
2. Quintiere J.G. *Fundamentals of fire phenomena*. England, Chichester, John Wiley and Sons Ltd, 2006. DOI: 10.1002/0470091150.fmatter
3. Beyler C., Carpenter D., Dinenno P. Introduction to fire modeling. *Fire Protection Handbook*. 20th ed. Quincy, National Fire Protection Association, 2008.
4. Severy D.M., Blaisdell D.M., Kerkhoff J.F. Automotive collision fires. *SAE Technical Paper.* 1974. DOI: 10.4271/741180.
5. Katsuhiro Okamoto, Norimichi Watanabe, Yasuaki Hagimoto, Tadaomi Chigira, Ryoji Masano, Hitoshi Miura et al. Burning behavior of sedan passenger cars. *Fire Safety Journal*. 2009; 44(3):301-310. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.07.001
6. Cheshko I.D., Skodtayev S.V., Teplyakova T.D. Classification of emergency fire-hazardous operations of electric networks of cars and the scheme of identifying their trails after the fire. *Problems of Technosphere Risk Management*. 2019; 1(49):107-115. (rus.).
7. Bogatishchev A.I. *Comprehensive research of fire hazardous modes in mains of electrical equipment of vehicles : dissertation of the candidate of technical sciences*. Moscow, 2002; 269. (rus.).
8. Cheshko I.D. *Examination of fire (objects, methods, methods of research).* Saint Petersburg, Saint Petersburg Institute of Fire Safety of Ministry of the Interior of Russian Federation, 1997; 562. (rus.).
9. Cheshko I.D., Mokryak A.Yu., Skodtaev S.V. Formation mechanism of excess currents passage traces in copper conductors. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta GPS MCHS Rossii*. 2015; 1:41-46. URL: https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V71/7.pdf (rus.).
10. Mokryak A.Yu. *Determination of the nature of melting of copper conductors and brass current-carrying products in the examination of fires at power facilities : dissertation of the candidate of technical sciences*. Moscow, 2018; 140. (rus.).
11. Skodtaev S.V. *Mechanism and morphological features of emergency fire-dangerous processes in electric networks of cars : dissertation of the candidate of technical sciences*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia, 2019; 144. (rus.).
12. Smelkov G.I., Czeshko I.D., Plotnikov V.G. Experimental modeling of fire-alarm emergency modes in electrical wires. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta GPS MCHS Rossii*. 2017; 3:121-128. DOI: 10.24411/2218-130X-2017-00016 (rus.).
13. Nedobitkov A.I. Study of microhardness of a copper conductor subjected to current overload in vehicle electric mains. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(2):17-25. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.02.17-25 (rus.).
14. Cheshko I.D., Mokryak A.Yu., Mokryak A.V. Evolution of the methodology of distinguishing “victim” from “cause” beads of copper conductors by short circuit. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta GPS MCHS Rossii.* 2018; 3:39-45. DOI: 10.24411/2218-130x-2018-00047 (rus.).
15. Delplace M., Vos E. Electric short circuits help the investigator determine where the fire started. *Fire Technology*. 1983; 19(3):185-191. DOI: 10.1007/bf02378698
16. Wright S.A., Loud J.D., Blanchard R.A. Globules and beads: what do they indicate about small-diameter copper conductors that have been through a fire? *Fire Technology*. 2015; 51(5):1051-1070. DOI: 10.1007/s10694-014-0455-9
17. Babrauskas V. Arc mapping: a critical review. *Fire Technology*. 2018; 54(3):749-780. DOI: 10.1007/s10694-018-0711-5

18. Hoffmann D.J., Swonder E.M., Burr M.T. Arc faulting in household appliances subjected to a fire test. *Fire Technology*. 2016; 52(6):1659-1666. DOI: 10.1007/s10694-015-0556-0
19. Kuan-Heng Liu, Yung-Hui Shih, Guo-Ju Chen, Jaw-Min Chou. Microstructural study on oxygen permeated arc beads. *Journal of Nanomaterials*. 2015; 1-8. DOI: 10.1155/2015/373861
20. Murray I., Ajersch F. New metallurgical techniques applied to fire investigation. *Fire & Materials '2009*. London, Interscience Communications Ltd., 2009; 857-869.
21. Carey N.J. *Developing a reliable systematic analysis for arc fault mapping* : Ph. D. Diss. Strathclyde, United Kingdom, University of Strathclyde, 2009.
22. Smelkov G.I. *Fire safety of wirings.* Moscow, Cable LLC Publ., 2009; 328. (rus.).
23. Lewis K.H., Templeton B. Morphological variation in copper arcs during post-arc fire heating. *Proceedings of 3rd International Symposium on Fire Investigation Science & Technology*. Sarasota, National Association of Fire Investigators, 2008; 183-195.
24. Sysoyeva T.P., Motorygin Yu.D. Particular of arrangement of fir-tree structures in fusion of copper conductors at transport vehicles. *Problems of Technosphere Risk Management*. 2014; 4(32):34-41. (rus.).
25. Roby R.J., McAllister J. *Final technical report for Award No. 2010-DN-BX-K246* : *Forensic investigation techniques for inspecting electrical conductors involved in fire*. Columbia, Combustion Science & Engineering, Inc., 2012. URL: https://www.ncjrs.gov/pdffiles1/nij/grants/239052.pdf
26. Taubkin I.S., Saklantiy A.R. Methodological resources for investigating the failure status of electrical wiring with copper conductors as the cause of fire. *Theory and Practice of Forensic Science.* 2018; 13(3):38-46. (rus.). DOI: 10.30764/1819-2785-2018-13-3-38-46.
27. Nedobitkov A.I. Specific features of short circuit in automobile electrical system. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(5):34-49. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.05.34-49 (rus.).
28. Parrott K.D., Stahl D.R. Electrical arcs and sparks: A literature review of definitions and their implications in the analysis of 12 volt direct current electrical system fires. *International Symposium on Fire Investigation Science & Technology* (ISFI), 2014. URL: https://es.stahl-engineering.com/post/electrical-arcs-and-sparks-12-volt-direct-current-electrical-system-fires
29. Iskhakov Kh.I., Pakhomov A.V., Kaminsky Ya.N. *Fire safety of the car*. Moscow, Transport Publ., 1987; 87. (rus.).
30. Ditenberg I.A., Denisov K.I., Tyumentsev A.N., Korchagin M.A., Korznikov A.V. Microstructural percularities of copper and mechanisms of its hardening after mechanical activation and torsion in Bridgman anvils. *Physical mesomechanics*. 2013; 16(6):81-87. (rus.).
31. Zagulyaev D.V., Yaropolova N.G., Komissarova I.A., Konovalov S.V., Gromov V.E. Regularities of microhardness copper change after magnetic treatment. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia/Basic Problems of Material Science (BPMS).* 2013; 10(2):261-265. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18910335 (rus.).

Поступила 21.09.2020, после доработки 20.10.2020;
принята к публикации 28.10.2020
Received September 21, 2020; Received in revised form October 20, 2020;
Accepted October 28, 2020

Информация об авторе

НЕДОБИТКОВ Александр Игнатьевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Восточно-Казахстанский государственный технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; ORCID: 0000-0003-4605-9668; e-mail: a.nedobitkov@mail.ru

Information about the author

Alexandr I. NEDOBITKOV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Research, D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; ORCID: 0000-0003-4605-9668; e-mail: a.nedobitkov@mail.ru