

Особенности токовой перегрузки в автомобильной электрической сети

© А. И. Недобитков✉

Казахский гуманитарно-юридический инновационный университет
(Республика Казахстан, 070014, г. Усть-Каменогорск, ул. Астана, 48)

РЕЗЮМЕ

Введение. Приведенные в статье данные свидетельствуют о том, что проблема повышения пожарной безопасности автотранспортных средств очень актуальна. Целью статьи является разработка научно обоснованного метода исследования медного проводника, подвергнутого действию сверхтока, 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. Поверхности разрушения медного проводника подвергались анализу без предварительной пробоподготовки.

Результаты и обсуждение. На основе анализа экспериментальных данных показано, что температура медного проводника, подвергнутого токовой перегрузке, существенно различается по его длине. Натурными наблюдениями и экспериментальными результатами установлено, что разрушение медного проводника под действием сверхтока происходит в местах, имеющих предварительное напряжение вследствие пластической деформации. Экспериментально также подтверждено, что образование шаровых оплавлений медного проводника, подвергнутого токовой перегрузке, может происходить при температуре значительно ниже температуры плавления меди. На основе анализа теоретических данных показано, что при токовой перегрузке в медном проводнике происходят не только тепловые и электромагнитные процессы, но и пластическая дисторсия.

Заключение. Предложен метод дифференциации повреждения при пожаре (токовая перегрузка, короткое замыкание) медного проводника. Токовая перегрузка характеризуется такими признаками, как вздутия или шаровые оплавления, расположенные в местах изгиба медного проводника, отсутствие признаков массопереноса. Установлено, что признаки, выявленные на поверхностях разрушения медного проводника, подвергнутого протеканию сверхтока, являются устойчивыми и не подвержены изменениям в естественных условиях хранения. Приведенные в статье данные могут быть использованы специалистами при экспертном исследовании медных проводников, изымаемых с мест пожаров, установлении механизма их повреждения и, в конечном счете, причины пожара автомобиля.

Ключевые слова: пожар; медный проводник; большое переходное сопротивление; короткое замыкание; сверхток; медь; растровая электронная микроскопия; диагностический признак; микрослед; пожарно-техническая экспертиза, пластическая дисторсия.

Для цитирования: Недобитков А. И. Особенности токовой перегрузки в автомобильной электрической сети // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 4. — С. 42–50. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.42-50.

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

Peculiarities of current overload in the car electric network

© Alexandr I. Nedobitkov✉

Kazakh Humanitarian Law Innovative University
(Astana St., 48, Ust-Kamenogorsk, 070014, Kazakhstan)

ABSTRACT

Introduction. The data given in the article show that the problem of fire safety in motor vehicles is highly relevant. The purpose of the article is to develop a scientifically based method of research for the copper conductor exposed to overcurrent to find the reason of its damage when making a fire investigation.

Materials and methods. The research was conducted using the JSM-6390LV scanning electron microscope for energy dispersive spectroscopy. The surfaces of the copper conductor rupture were analyzed without any preliminary sample preparation.

Results and discussion. The analysis of the experimental evidence demonstrates that the temperature of the copper conductor exposed to current overload varies significantly along its length. It was found through the field studies and experimental results that the rupture of the copper conductor under the action of overcurrent happens in the sections that have prestress due to the plastic deformation. The experiment proved that the formation of ball fusing of the copper conductor exposed to current overload may take place at a substantially lower temperature than that of the copper smelting. The analysis of the theoretical data shows that during the current overload not

only thermal and electromagnetic processes but also plastic distortion occur at the copper conductor. It also demonstrates that the strand connection of copper wires results in a fire hazard not in every instance.

Conclusion. A method for differentiating fire damages at the copper conductor (current overload, short circuit) was suggested. The current overload has such features as blistering or ball fusing in the bending points and the lack of any signs of mass transfer. It was found that the features of the damaged surfaces of the copper conductor exposed to overcurrent are stable and not subject to changes in the natural storage conditions. The data given in the article can be used by specialists when making an expert examination of copper conductors from the fire locations, identifying a mechanism for their damage and, finally, a cause of fire.

Keywords: fire; copper conductor; high transition resistance; short circuit; overcurrent; copper; scanning electron microscopy; diagnostic feature; ultratrace; fire investigation; plastic distortion.

For citation: A. I. Nedobitkov. Peculiarities of current overload in the car electric network. *Pozharovzryvobezopasnost/ Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 4, pp. 42–50 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.42-50.

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

Введение

Пожары, представляя собой тяжелую чрезвычайную ситуацию (ЧС), приносят значительный ущерб экономике государств, в частности в промышленно развитых странах он превышает 1 % национального дохода и имеет тенденцию к постоянному росту [1–3]. Пожары на автотранспортных средствах относятся к особо тяжелым ЧС.

В работах [4–13] показано, что отдельные элементы электрической системы автомобиля могут служить источником возгорания в случае возникновения аварийного режима в какой-либо функциональной цепи.

Авторы работы [6] подчеркивают, что при исследовании сгоревшего автомобиля практически всегда рассматривается так называемая “электрическая” версия возникновения пожара. Данным обстоятельством обусловлена насущная потребность в разработке и совершенствовании специальных методик исследования электросетей и электрооборудования автотранспортных средств после пожара [6].

Как наглядно показано авторами [4–13], в рамках судебной пожарно-технической экспертизы рассматривается вероятность возникновения пожара в результате протекания трех аварийных режимов работы электросети — короткого замыкания (КЗ), большого переходного сопротивления (БПС) и токовой перегрузки (ТП).

В диссертации [10] отмечается трудность визуальной дифференциации оплавлений медных проводников. Это мнение в той или иной форме поддерживается в работах [6, 9, 11, 12] а также такими исследователями, как V. Babrauskas, Kuan-Heng Liu, Yung-Hui Shih, Guo-Ju Chen и др., которые предлагают альтернативные методы исследования [14–23].

Настоящая работа, являясь продолжением исследований, выполненных авторами [6, 9, 12, 23], также посвящена установлению признаков, позволяющих идентифицировать причину разрушения медного проводника под действием сверхтока.

Целью работы является разработка научно обоснованного метода исследования медного проводника, подвергнутого воздействию токовой перегрузки.

Исходя из этого были поставлены следующие задачи исследования:

- показать, что разрушение медного проводника автомобильной электрической сети под действием токовой перегрузки происходит в первую очередь в местах, имеющих предварительное напряжение вследствие пластической деформации;
- экспериментально доказать, что образование шаровых оплавлений медного проводника под действием сверхтока возможно при температуре, которая существенно ниже температуры плавления меди;
- экспериментально подтвердить, что температура медного проводника, подвергнутого токовой перегрузке, различна по его длине;
- подтвердить предположение, что признаки, выявленные на поверхности разрушения медного проводника, подвергнутого протеканию сверхтока, являются устойчивыми и не подвержены изменениям в естественных условиях хранения автомобиля (без умышленного уничтожения признаков).

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в Центре опережающего развития “Veritas” Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева на растровом электронном микроскопе JSM-6390LV с приставкой для энергодисперсионного микроанализа. Поверхности разрушения медного проводника подвергались анализу без предварительной пробоподготовки.

В настоящей работе рассматривается исследование медного многопроволочного проводника в составе жгута проводов тахографа, подвергнутого токовой перегрузке и изъятых с места пожара, а также результаты экспериментальных исследований.

У автомобиля КамАЗ-65117 в результате электродугового процесса в панели приборов протеканию сверхтока подвергся жгут проводов тахографа. Жгут длиной около 6 м состоял из семи многопроволочных проводников сечением 0,785 мм² каждый (рис. 1, а). У двух многопроволочных проводников

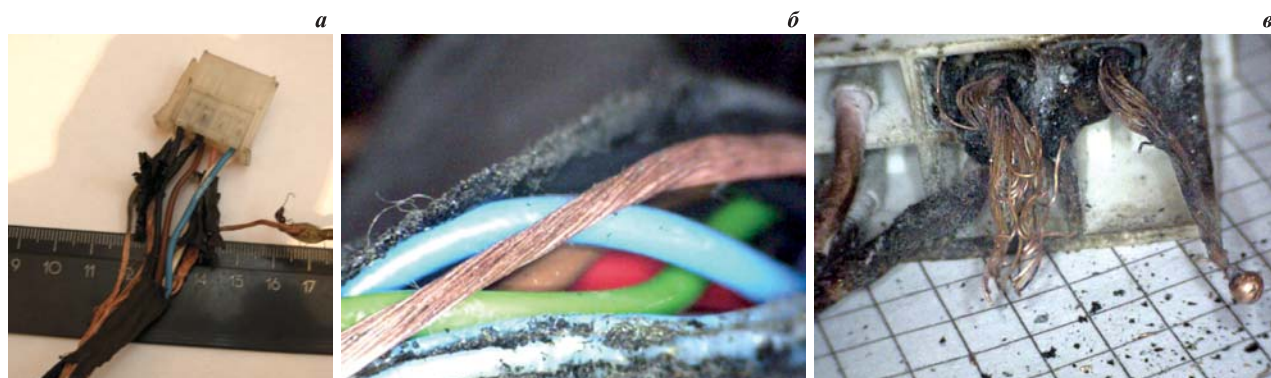


Рис. 1. Вид жгута проводов тахографа, изъятый с места пожара: *а* — сохранение изоляции возле соединительного разъема у всех многопроволочных проводников; *б* — полное отсутствие изоляции у многопроволочного проводника; *в* — разрушение двух медных многопроволочных проводников

Fig. 1. View of the tachograph wiring harness withdrawn from the site of the fire: *a* — maintaining insulation near the connector of all multi-wire conductors; *b* — complete absence of insulation in a multiwire conductor; *v* — destruction of two copper stranded conductors

практически по всей длине изоляция отсутствовала, что подтверждает наличие токовой перегрузки, поскольку короткое замыкание не вызывает выгорания изоляции на длине 6 м. Что особенно характерно, разрушение двух многопроволочных проводников произошло в области технологического изгиба, обусловленного соединительным разъемом. Разрушение двух многопроволочных проводников сопровождалось оплавлением медных проволок в виде шара и косога среза (рис. 1, в). Изоляция у всех многопроволочных проводников сохранилась в непосредственной близости от разъема (см. рис. 1, а).

Вторым объектом исследования являлся одножильный медный проводник без изоляционного покрытия длиной 44 см, сечением $0,64 \text{ мм}^2$. Проводник закрепляли на установке У-1134М и пропускали через него ток. Согласно справочным данным максимально допустимая величина силы тока для медного проводника такого сечения составляет 12–15 А.

Результаты и их обсуждение

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование состояния одножильного медно-

го проводника без изоляции, подвергнутого протеканию сверхтока. Одножильный медный проводник был выбран в целях максимальной простоты и наглядности эксперимента, поскольку реальный пример токовой перегрузки демонстрирует многожильный проводник жгута проводов тахографа (см. рис. 1).

На рис. 2 показаны характерные признаки шарового оплавления многожильного проводника жгута проводов тахографа (см. рис. 1, в), которые позволяют идентифицировать причину повреждения как токовую перегрузку.

В работах [9, 10] отмечается, что утончения и утолщения проводника в области шарового оплавления, а также обрыв проволок являются характерными признаками токовой перегрузки.

На рис. 3 показано состояние медного однопроволочного проводника под действием токовой перегрузки. При токе 25 А лак начинает дымиться, при токе 33 А середина проводника приобретает черный цвет, при токе 35 А наблюдаются искры и брызги лака и оксидной пленки (дым), при токе 40 А середина проводника становится красной, затем ток самопроизвольно падает до 38 А. Температура про-



Рис. 2. Оплавление многопроволочного проводника: *а* — общий вид, увеличение $30\times$; *б* — утончения и утолщения, увеличение $43\times$; *в* — сплавление проволочек многопроволочного проводника, увеличение $70\times$

Fig. 2. Burn-off of multiwire explorer: *a* — general view, increase of $30\times$; *b* — thinning and bulges, increase of $43\times$; *v* — meltback of ambages of multiwire explorer, increase of $70\times$

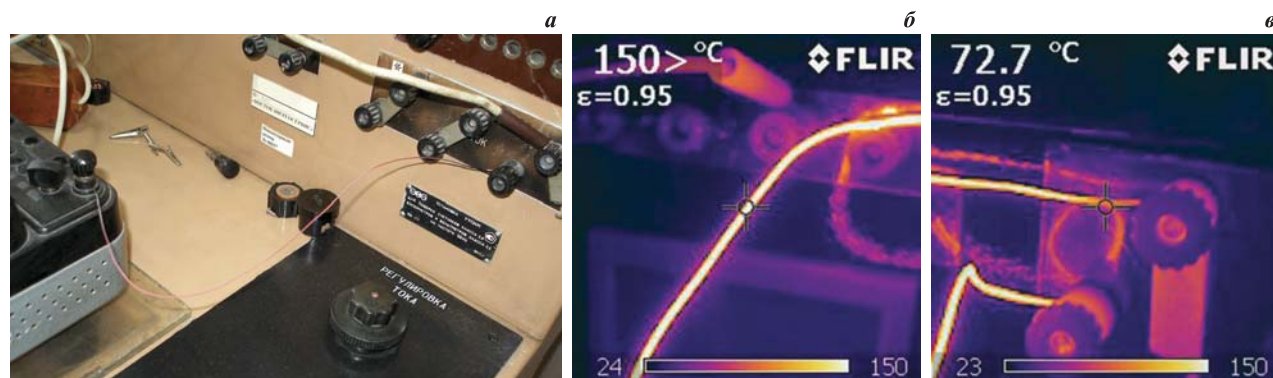


Рис. 3. Однопроволочный проводник под действием токовой перегрузки: *а* — середина проводника красная от нагрева, концы темные; *б* — температура середины проводника; *в* — температура на концах проводника

Fig. 3. Onewire explorer under the action of current overload: *a* — the middle of explorer is red from heating, ends dark; *b* — temperature of middle of explorer; *v* — temperature of ends of explorer

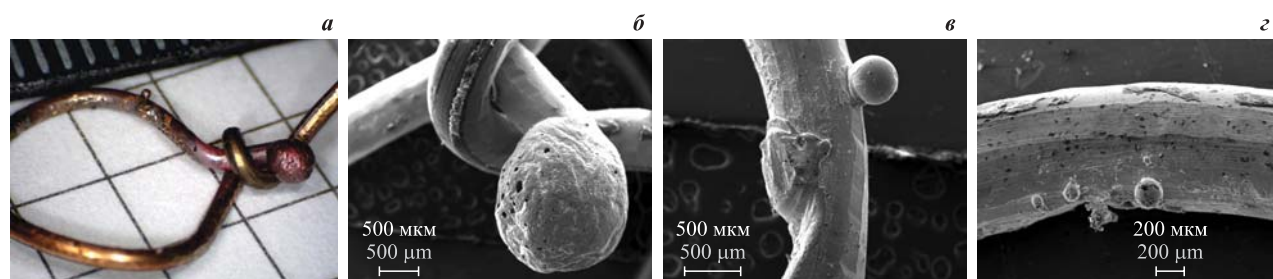


Рис. 4. Шаровые оплавления медного однопроволочного проводника: *а* — общий вид; *б* — шаровое оплавление на торце проводника, увеличение 30[×]; *в* — шаровое оплавление по касательной к поверхности проводника, увеличение 45[×]; *г* — шаровое оплавление по касательной к поверхности проводника, увеличение 60[×]

Fig. 4. Ball burn-offs of copper onewire explorer: *a* — general view; *b* — ball burn-off on the butt end of explorer, increase of 30[×]; *v* — ball burn-off on a tangent to the surface of explorer, increase of 45[×]; *g* — ball burn-off on a tangent to the surface of explorer, increase of 60[×]

водника измерялась дистанционно тепловизором (см. рис. 3). При этом было зафиксировано, что температура на концах проводника не превышала 73 °С, в то время как цвет середины проводника менялся от светло-красного до оранжевого, что соответствует температуре примерно 830–900 °С. Таким образом, экспериментально установлено, что при токовой перегрузке температура по длине проводника распределяется неравномерно.

По аналогии с работами [9, 10] при дальнейшем увеличении силы тока произошло разрушение проводника. Однако проводник разрушился не в точке с максимальной температурой в середине проводника, а возле места соединения с источником питания, где температура существенно ниже, а проводник имеет остаточную пластическую деформацию изгиба (см. рис. 3).

На рис. 4 приведен фрагмент разрушившегося однопроволочного проводника.

Необходимо отметить, что шаровые оплавления образовались не только по касательной к поверхности проводника, но и на его торце (см. рис. 4). На рис. 5 показаны точки микроанализа шаровых оплавлений, приведенных на рис. 4, *а* и 4, *в*, а в табл. 1 и 2 приведены результаты микроанализа.

Необходимо отметить, что ГОСТ 859–2001 допускает содержание в меди марки М1 до 0,005 % железа. Из сравнения данных табл. 1 и 2 следует вывод, что процесс, вызвавший образование шаровых оплавлений, один и тот же, и он не связан с большим переходным сопротивлением или коротким замыканием. Как показано в работе [12], короткое замыкание характеризуется массопереносом, чего в данном случае не наблюдается. Кроме того, следует подчеркнуть, что образование шаровых оплавлений произошло в зоне наиболее низкой температуры проводника, обусловленной действием токовой перегрузки. Это свидетельствует о том, что образование шарового оплавления на торце медного проводника не связано с его нагревом до температуры плавления. Общеизвестно, что текучесть — способность пластичных металлов и тел при постепенном повышении давления уступать действию сдвигающих сил и течь подобно вязким жидкостям. В работе [24] 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 [25] показана

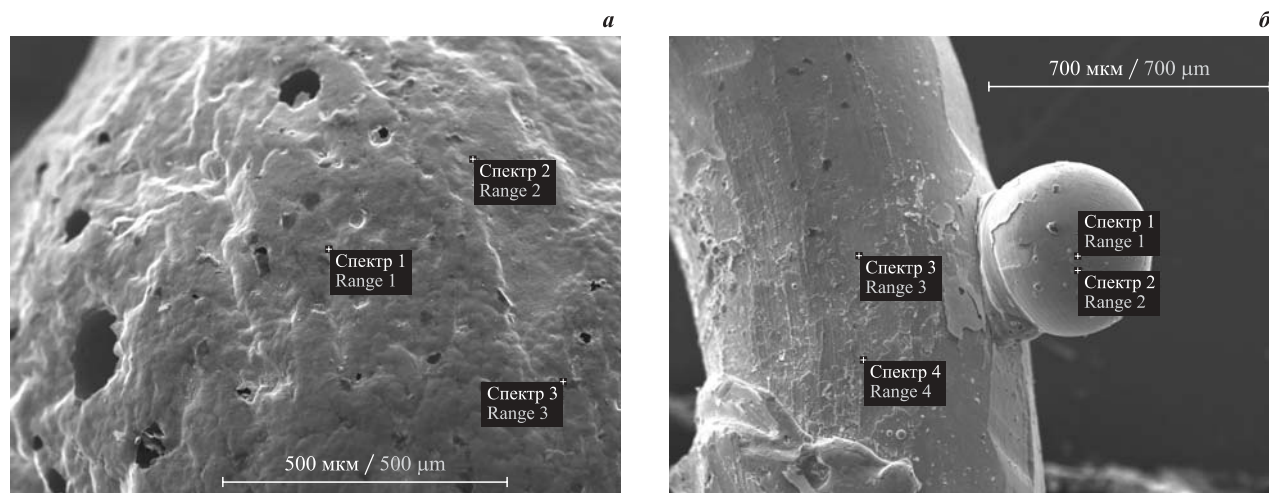


Рис. 5. Точки микроанализа на поверхности повреждения: *а* — шаровое оплавление на торце проводника (см. рис. 4,*а*); *б* — шаровое оплавление по касательной к поверхности проводника (см. рис. 4,*б*)

Fig. 5. Points of microanalysis on the surface of damage: *a* — ball burn-off on the butt end of explorer (see Fig. 4,*a*); *b* — ball burn-off on a tangent to the surface of explorer (see Fig. 4,*v*)

Таблица 1. Результаты микроанализа участка на рис. 5,*а*

Table 1. The results of the microanalysis of the section shown in Fig. 5,*a*

Номер точки измерения Measurement point number	Содержание химического элемента, % масс. Content of chemical element, % by mass		
	O	Fe	Cu
Спектр 1 Range 1	13,13	—	86,87
Спектр 2 Range 2	22,17	1,79	76,04
Спектр 3 Range 3	14,53	—	85,47

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, но данный вопрос будет рассмотрен в отдельной работе.

Полученные данные дополняют результаты, полученные в работах [9, 10]. В них использовалась кратность токовой перегрузки 4–12 и выше, что трудно достижимо в электрической цепи автомобиля.

Следует отметить сопоставимость результатов исследования многопроволочного проводника в составе жгута тахографа и одиночного медного проводника. В этих двух случаях разрушение происходило в области изгиба проводников, и температура в местах подсоединения образцов была ниже, чем в середине, о чем свидетельствует и сохранившаяся изоляция, и результаты измерений тепловизором. Это говорит о том, что при токовой перегрузке проводники разрушаются в первую очередь в местах,

Таблица 2. Результаты микроанализа участка на рис. 5,*б*

Table 2. The results of the microanalysis of the section shown in Fig. 5,*b*

Номер точки измерения Measurement point number	Содержание химического элемента, % масс. Content of chemical element, % by mass		
	O	Fe	Cu
Спектр 1 Range 1	1,69	0,95	97,36
Спектр 2 Range 2	14,74	—	84,56
Спектр 3 Range 3	3,29	—	96,71
Спектр 4 Range 4	3,90	—	95,25

подверженных предварительному напряжению (изгиб, надлом и т. п.). Однако это не исключает разрушения проводника в любом другом месте при значительной токовой перегрузке, что является косвенным диагностическим признаком [9, 10].

В работе [10] высказывается также мнение, что под слоем изоляции создается давление, вызывающее движение металла проводника, что приводит к возникновению на поверхности медного проводника образований сферической формы. Кроме того, автором [10] формулируется промежуточный вывод о том, что вздутия на поверхности медного проводника образуются только при наличии на нем целой изоляции. Экспериментальные данные с медным проводником без изоляции показывают, что наличие или отсутствие изоляции не оказывает существенного влияния на механизм образования шаровых оплавлений.

Исследованные образцы медных проводников хранились 3 мес. (что больше среднего срока расследования дел о пожарах), в разных условиях (в помещении без упаковки; в помещении в герметичной упаковке; на открытом воздухе, без доступа воды, в жидком агрегатном состоянии, т. е. без погружения в воду). При сравнении образцов установлено, что выявленные признаки являются устойчивыми и не подвержены изменениям в естественных условиях хранения (без умышленного уничтожения их).

Таким образом, в результате исследования методом растровой микроскопии фрагментов медных проводников, подвергшихся протеканию сверхтока, установлены характерные признаки, позволяющие идентифицировать процесс, который привел к их разрушению (токовая перегрузка, короткое замыкание). Токовая перегрузка характеризуется такими признаками, как вздутия или шаровые оплавления, расположенные в местах изгиба медного проводника, отсутствие признаков массопереноса.

Следует отметить, что если на месте пожара обнаружено соединение проводников, выполненное методом “скрутки”, то, как правило, именно на это обстоятельство указывают, как на причину пожара. Однако настоящим исследованием экспериментально показано, что при протекании сверхтока в деформированном проводнике образуются шаровые оплавления, но это является следствием, а не причиной. Таким образом, соединение медных проводников методом “скрутки” далеко не всегда приводит к возникновению пожароопасного режима. Для установления причинной связи между “скруткой” и пожа-

ром должны иметь место признаки большого переходного сопротивления [26].

Заключение

Экспериментально показано, что разрушение медного проводника автомобильной электрической сети под действием токовой перегрузки происходит в первую очередь в местах, имеющих предварительное напряжение вследствие пластической деформации.

Доказано, что образование шаровых оплавлений медного проводника под действием сверхтока возможно при температуре, которая существенно ниже температуры плавления меди.

Кроме того, наглядно проиллюстрировано, что температура медного проводника, подвергнутого токовой перегрузке, различна по его длине.

Показано также, что растровую микроскопию можно использовать при исследовании фрагментов медных проводников в качестве не только вспомогательного, но и основного метода исследования.

Настоящим исследованием установлено, что признаки, выявленные на поверхностях разрушения медных проводников, являются устойчивыми и не подвержены изменениям в естественных условиях хранения (без умышленного уничтожения их).

Полученные результаты могут быть использованы при экспертном исследовании фрагментов медных проводников, изымаемых с мест пожаров, установлении механизма их повреждения и, в конечном счете, причины пожара автомобиля. Знание технической причины пожара даст возможность разработать профилактические мероприятия и технические решения, направленные на ее устранение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брушлинский Н. Н., Соколов С. В., Вагнер П. Человечество и пожары. — М. : ООО “ИПЦ Маска”, 2007. — 142 с.
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., Dinunno P. Introduction to fire modeling. Fire Protection Handbook. — 20th ed. — Quincy : National Fire Protection Association, 2008.
4. Severy D., Blaisdell D., Kerkhoff J. Automotive collision fires // SAE Technical Paper 741180, 1974. DOI: 10.4271/741180.
5. Katsuhiro Okamoto, Norimichi Watanabe, Yasuaki Hagimoto, Tadaomi Chigira, Ryoji Masano, Hitoshi Miura, Satoshi Ochiai, Hideki Satoh, Yohsuke Tamura, Kimio Hayano, Yasumasa Maeda, Jinji Suzuki. Burning behavior of sedan passenger cars // Fire Safety Journal. — 2009. — Vol. 44, No. 3. — P. 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.
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. Смельков 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.
12. 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.
13. Смельков Г. И. Пожарная безопасность электропроводок. — М. : ООО “Кабель”, 2009. — 328 с.
14. Babrauskas V. Arc beads from fires: Can ‘cause’ beads be distinguished from ‘victim’ beads by physical or chemical testing? // Journal of Fire Protection Engineering. — 2004. — Vol. 14, No. 2. — P. 125–147. DOI: 10.1177/1042391504036450.
15. Delplace M., Vos E. Electric short circuits help the investigator determine where the fire started // Fire Technology. — 1983. — Vol. 19, No. 3. — P. 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. — P. 1051–1070. DOI: 10.1007/s10694-014-0455-9.
17. Babrauskas V. Arc mapping: a critical review // Fire Technology. — 2018. — Vol. 54, Issue 3. — P. 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. — P. 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. — Article ID 373861. — 8 p. DOI: 10.1155/2015/373861.
20. 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. — P. 183–195.
21. Murray I., Ajersch F. New metallurgical techniques applied to fire investigation // Fire & Materials '2009. — London : Interscience Communications Ltd., 2009. — P. 857–869.
22. Carey N. J. Developing a reliable systematic analysis for arc fault mapping : Ph. D. diss. — Strathclyde, United Kingdom : University of Strathclyde, 2009.
23. Roby R. J., McAllister J. Forensic investigation techniques for inspecting electrical conductors involved in fire // Final Technical Report for Award No. 239052. — Columbia : Combustion Science & Engineering, Inc., 2012.
24. Васильев Л. С. Структурно-фазовые превращения и критические явления при интенсивном пластическом деформировании и разрушении металлов и сплавов : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Ижевск, 2010. — 405 с.
25. Панин В. Е., Егорушкин В. Е., Панин А. В., Чернявский А. Г. Пластическая дисторсия — фундаментальный механизм в нелинейной мезомеханике пластической деформации и разрушения твердых тел // Физическая мезомеханика. — 2016. — Т. 19, № 1. — С. 31–46.
26. Экспертное исследование после пожара контактных узлов электрооборудования в целях выявления признаков больших переходных сопротивлений : метод. реком. / К. Б. Лебедев, А. Ю. Мокряк, И. Д. Чешко. — М. : ВНИИПО, 2008. — 29 с.

REFERENCES

1. N. N. Brushlinskiy, S. V. Sokolov, P. Wagner. *Chelovechestvo i pozhary* [Humanity and fires]. Moscow, IPTs Maska Publ., 2007. 142 p. (in Russian).
2. J. G. Quintiere. *Fundamentals of fire phenomena*. England, Chichester, John Wiley and Sons Ltd, 2006. DOI: 10.1002/0470091150.fmatter.
3. C. Beyler, D. Carpenter, P. Dinunno. *Introduction to fire modeling*. Fire Protection Handbook. 20th ed. Quincy, National Fire Protection Association, 2008.
4. D. Severy, D. Blaisdell, J. Kerkhoff. Automotive collision fires. *SAE Technical Paper 741180*, 1974. DOI: 10.4271/741180.

5. Katsuhiro Okamoto, Norimichi Watanabe, Yasuaki Hagimoto, Tadaomi Chigira, Ryoji Masano, Hitoshi Miura, Satoshi Ochiai, Hideki Satoh, Yohsuke Tamura, Kimio Hayano, Yasumasa Maeda, Jinji Suzuki. 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. I. D. Cheshko, S. V. Skodtaye, T. D. Teplyakova. Classification of emergency fire-hazardous operations of electric networks of cars and the scheme of identifying their trails after the fire. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere / Problems of Technosphere Risk Management*, 2019, no. 1(49), pp. 107–115 (in Russian).
7. A. I. Bogatishchev. *Comprehensive research of fire hazardous modes in mains of electrical equipment of vehicles*. Cand. Sci. (Eng.) Diss. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2002. 269 p. (in Russian).
8. I. D. Cheshko. *Ekspertiza pozharov (obyekty, metody, metodiki issledovaniya)* [Examination of fire (objects, methods, methods of research)]. Saint Petersburg, Saint Petersburg Institute of Fire Safety of Ministry of the Interior of Russian Federation Publ., 1997. 562 p. (in Russian).
9. I. D. Cheshko, A. Yu. Mokryak, S. V. Skodtaye. Formation mechanism of excess currents passage traces in copper conductors. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2015, no. 1, pp. 41–46 (in Russian).
10. A. Yu. Mokryak. *Determination of the nature of melting of copper conductors and brass current-carrying products in the examination of fires at power facilities*. Cand. Sci. (Eng.) Diss. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2018. 140 p. (in Russian).
11. G. I. Smelkov, I. D. Cheshko, V. G. Plotnikov. Experimental modeling of fire-alarm emergency modes in electrical wires. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2017, no. 3, pp. 121–128 (in Russian).
12. A. I. Nedobitkov. Specific features of short circuit in automobile electrical system. *Pozharovzryvo-bezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 5, pp. 34–49 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.05.34-49.
13. G. I. Smelkov. *Pozharnaya bezopasnost elektroprovodok* [Fire safety of wirings]. Moscow, Cable LLC. Publ., 2009. 328 p. (in Russian).
14. V. Babrauskas. Arc beads from fires: Can ‘cause’ beads be distinguished from ‘victim’ beads by physical or chemical testing? *Journal of Fire Protection Engineering*, 2004, vol. 14, no. 2, pp. 125–147. DOI: 10.1177/1042391504036450.
15. M. Delplace, E. Vos. 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. S. A. Wright, J. D. Loud, R. A. Blanchard. 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. V. Babrauskas. Arc mapping: a critical review. *Fire Technology*, 2018, vol. 54, issue 3, pp. 749–780. DOI: 10.1007/s10694-018-0711-5.
18. D. J. Hoffmann, E. M. Swonder, M. T. Burr. 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, article ID 373861. 8 p. DOI: 10.1155/2015/373861.
20. K. H. Lewis, B. Templeton. Morphological variation in copper arcs during post-arc fire heating. In: *Proceedings of 3rd International Symposium on Fire Investigation Science & Technology*. Sarasota, National Association of Fire Investigators, 2008, pp. 183–195.
21. I. Murray, F. Ajersch. New metallurgical techniques applied to fire investigation. In: *Fire & Materials '2009*. London, Interscience Communications Ltd., 2009, pp. 857–869.
22. N. J. Carey. *Developing a reliable systematic analysis for arc fault mapping*. Ph. D. Diss. Strathclyde, United Kingdom, University of Strathclyde, 2009.
23. R. J. Roby, J. McAllister. Forensic investigation techniques for inspecting electrical conductors involved in fire. In: *Final Technical Report for Award No. 239052*. Columbia, Combustion Science & Engineering, Inc., 2012.
24. L. S. Vasilyev. *Structural-phase transformations and critical phenomena during intensive plastic deformation and destruction of metals and alloys*. Dr. Sci. (Phys.-Math.) Diss. Izhevsk, 2010. 405 p. (in Russian).

25. V. E. Panin, R. W. Armstrong. Hall-petch analysis for temperature and strain rate dependent deformation of polycrystalline lead. *Physical Mesomechanics*, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 35–40.
26. K. B. Lebedev, A. Yu. Mokryak, I. D. Cheshko. *Ekspertnoye issledovaniye posle pozhara kontaktnykh uzlov elektrooborudovaniya v tselyakh vyyavleniya priznakov bolshikh perekhodnykh soprotivleniy. Metodicheskiye rekomendatsii* [Expert research after the fire of the contact points of electrical equipment in order to identify signs of large transient resistance: Methodological recommendations]. Moscow, VNIPO Publ., 2008. 29 p. (in Russian).

Поступила 22.04.2019; после доработки 06.06.2019; принята к публикации 12.06.2019

Received 22 April 2019; received in revised form 6 June 2019; accepted 12 June 2019

Информация об авторе

НЕДОБИТКОВ Александр Игнатьевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра информатики и математики, Казахский гуманитарно-юридический инновационный университет, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; ORCID: 0000-0003-4605-9668; e-mail: a.nedobitkov@mail.ru

Information about the author

Alexsandr I. NEDOBITKOV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Informatics and Mathematics, Kazakh Humanitarian Law Innovative University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; ORCID: 0000-0003-4605-9668; e-mail: a.nedobitkov@mail.ru