

**А. И. НЕДОБИТКОВ**, канд. техн. наук, доцент кафедры информатики и математики, Казахский гуманитарно-юридический инновационный университет (Республика Казахстан, 070014, г. Усть-Каменогорск, ул. Астана, 48; e-mail: a.nedobitkov@mail.ru)

УДК 656.13;614.84

## ОСОБЕННОСТИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В АВТОМОБИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Показано, что пожары на автотранспортных средствах относятся к особо тяжелым происшествиям, поэтому проблема повышения их пожарной безопасности очень актуальна. Экспериментально проиллюстрировано, что при коротком замыкании в электрической цепи, содержащей аккумуляторные батареи типа 51АН/280А и 60АН/330А, в ряде случаев не происходит образования шарового оплавления у медного многопроволочного проводника сечением  $0,75 \text{ мм}^2$ , а наблюдается выгорание отдельных проволок проводника, прилипание их к стальной поверхности и разрушение в непосредственной близости от точки контакта. Приведены результаты исследования на растровом электронном микроскопе JSM-6390LV образцов медных многопроволочных проводников и стальной ленты, подвергшихся воздействию короткого замыкания при напряжении 12 и 24 В. Даны снимки поверхностей оплавления медных многопроволочных проводников и стальной ленты, подвергшихся воздействию короткого замыкания. Установлены характерные диагностические признаки, позволяющие методом растровой микроскопии идентифицировать причину повреждения при пожаре (высокотемпературное воздействие, короткое замыкание, токовая перегрузка) медного проводника в электрической цепи с напряжением 12 В. Установлено, что выявленные признаки являются устойчивыми и не подвержены изменениям в естественных условиях хранения автомобиля, получившего повреждения в результате термовоздействия.

**Ключевые слова:** пожар; растровая электронная микроскопия; диагностический признак; микрослед; судебная пожарно-техническая экспертиза; первичное короткое замыкание; вторичное короткое замыкание; токовая перегрузка; медный проводник.

**DOI:** 10.18322/PVB.2018.27.05.34-49

### Введение

Пожары причиняют значительный материальный ущерб, в частности уничтожают или повреждают имущество, а также приводят к гибели и ранению людей. Ущерб от пожаров в промышленно развитых странах превышает 1 % национального дохода и имеет тенденцию к постоянному росту [1–3]. Пожары на автотранспортных средствах относятся к особо тяжелым происшествиям.

В ряде работ [4–8] показано, что пожарная опасность электросистемы автомобиля определяется тем, что ее отдельные элементы могут служить источником возгорания в случае возникновения аварийного режима в какой-либо функциональной цепи. Необходимо отметить, что по данным ВНИИПО в Российской Федерации наблюдается тенденция увеличения доли числа пожаров на транспортных средствах по причине технической неисправности. В частности, доля числа пожаров на легковых автомобилях из-за технической неисправности увеличилась с 15,7 % в 2001 г. до 34,0 % в 2010 г. А в 2012 г. в Российской Федерации суммарное число пожаров, происшедших в результате неисправности сис-

тем, механизмов и узлов транспортного средства, а также неисправности его электропроводки, составило 7718 (40,0 %). В работе [8] отмечается, что в отдельных судебно-экспертных учреждениях Федеральной противопожарной службы (СЭУ ФПС) МЧС России доля экспертиз пожаров на автомобилях достигает 40–50 % от общего количества поступивших материалов. Необходимо напомнить, что с 2013 г. в общемировом масштабе стартовала и в настоящее время реализуется программа автоматизации автотранспортных средств. Например, автомобиль Mercedes-Benz S 500 2016 г. выпуска конструктивно имеет только около 80 блоков управления различными электрическими устройствами. Согласно данной программе к 2020 г. автоматизация автотранспортных средств должна достичь высокого уровня, при котором отсутствует контроль за автомобилем со стороны водителя и он лишь изредка берет управление на себя. К 2025 г. автомобили должны достичь уровня полной автоматизации, при котором водителю не нужно управлять транспортным средством. Тем не менее практика свидетельствует, что даже на автомобилях с высоким уровнем авто-

матизации имеют место случаи возгорания, в частности известен случай пожара на электромобиле Tesla Model S.

Таким образом, разработка мероприятий по предотвращению пожаров на автотранспорте имеет важное значение [4–9]. Одним из видов профилактических мероприятий является пожарно-техническая экспертиза.

По мнению автора [10], экспертиза пожаров основана на комплексе специальных знаний, необходимых для исследования места пожара, отдельных конструкций, материалов, изделий и их обгоревших остатков в целях получения информации, необходимой для установления очага пожара, его причины, путей распространения горения, природы обгоревших остатков, а также для решения некоторых других задач, возникающих в ходе анализа причин, вызвавших пожар.

Следует заметить, что подавляющее число выводов судебных экспертов относительно технических причин возникновения пожаров на автотранспорте носит предположительный (вероятностный) характер, что не позволяет разрабатывать и внедрять конкретные инженерные решения [11]. Это можно объяснить многими причинами, в том числе отсутствием современных научно обоснованных методик, позволяющих однозначно определить, например, первичность или вторичность короткого замыкания. Это косвенно подтверждают И. Д. Чешко и Г. И. Смелков в работе [9], указывая на необходимость совершенствования существующих методик.

Как наглядно показано авторами [9, 10, 12], если в очаговой зоне обнаружены характерные признаки разрушения токоведущих проводов, то неизбежно возникает вопрос о механизме повреждения (электродуговой или тепловой) и, в частности, о первичности или вторичности короткого замыкания. По мнению многих авторов, данный вопрос далеко не прост. Попытки решить его с помощью инструментальных методов криминалисты предпринимали еще в 50-х годах прошлого столетия [9, 10, 12]. К сожалению, апробированная и научно обоснованная универсальная методика отсутствует до настоящего времени, несмотря на наличие ряда решенных частных задач [4–22].

Так, например, авторы работы [22] на основе многочисленных экспериментальных данных пришли к выводу, что круглые медные глобулы с четкими линиями разграничения, традиционно определяемые как “наплывы”, образовывались на проводах не только под напряжением, но и без него. На некоторых проводах под напряжением возникала дуга, приводящая к образованию таких глобул. В то же время у некоторых проводов без напряжения дуга отсутствовала, но наблюдались эти характерные на-

плывы [22]. Под микроскопом наплывы некоторых проводов под напряжением имели пористую структуру и содержали большое количество внутренних поровых пространств, в то время как в других наплывах последние отсутствовали. Авторы [22] отмечают, что эта же тенденция была характерна и для проводов без напряжения.

В работе [22] наглядно показано, что при изучении образцов под растровым электронным микроскопом установлено отсутствие у них тенденций к изменениям в структуре зерна или химических составах. Внутренние зерновые структуры наплывов были исследованы на предмет размеров элементов микроструктуры, пористости и основных изменений. Ни по одному из изученных физических аспектов наплывов не обнаружено каких-либо отличительных особенностей для образцов проводов под напряжением и без него [22]. Это мнение поддерживают такие исследователи, как V. Babrauskas, Kuan-Heng Liu, Yung-Hui Shih, Guo-Ju Chen и др., которые указывают на неспособность научного сообщества на современном этапе дифференцировать первичные и вторичные оплавления медных проводников [16, 18]. В частности, V. Babrauskas в работе [16], оперируя координатами очага пожара, подвергает критическому анализу результаты, полученные N. J. Carey [21] в отношении первичности или вторичности короткого замыкания.

В то же время необходимо отметить, что в работе [6] приведены фактические данные, позволяющие по характеру излома медного проводника в зоне оплавления дифференцировать причину разрушения, обусловленную электродуговым или тепловым процессом. Настоящая работа также посвящена установлению признаков, позволяющих идентифицировать причину разрушения медного проводника.

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

Исходя из указанной цели, поставлены следующие задачи исследования:

- провести экспериментальные исследования по электродуговому разрушению медных проводников при напряжении 12 и 24 В;
- экспериментально подтвердить условия возникновения первичного короткого замыкания в автомобильной электрической сети;
- доказать, что на поверхности разрушения медного проводника, подвергнувшегося короткому замыканию, могут быть выявлены признаки, позволяющие идентифицировать электродуговой процесс;

- установить, что признаки, выявленные на поверхности разрушения медных проводников, подвергшихся короткому замыканию, являются устойчивыми и не подвержены изменениям в естественных условиях хранения (без умышленного уничтожения признаков);
- показать, что растровую микроскопию можно использовать при исследовании плавких вставок автомобильных предохранителей в качестве основного метода.

В настоящей статье рассматриваются фактические примеры исследования оплавлений медных проводников, подвергшихся короткому замыканию при напряжении 12 и 24 В.

### Материалы и методы

Исследования проводились в Региональной университетской лаборатории инженерного профиля “ИРГЕТАС” Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева с использованием растрового электронного микроскопа JSM-6390LV с приставкой для энергодисперсионного микроанализа. Поверхности разрушения медных проводников подвергались анализу без предварительной пробоподготовки. Схема испытаний приведена на рис. 1.

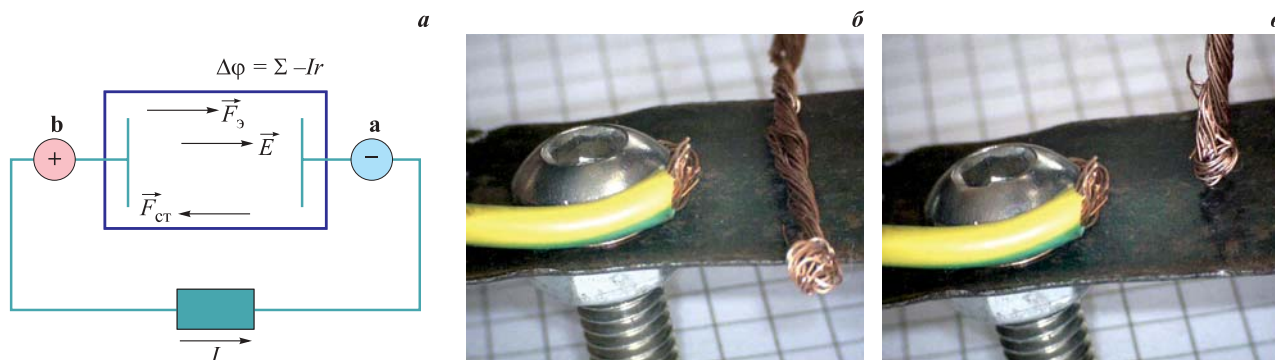
По аналогии с работой [7] для имитации режима короткого замыкания использовался многопроволочный медный провод сечением 0,75 мм<sup>2</sup>, как наиболее распространенный в автомобильных электрических сетях. Источником постоянного тока при напряжении 12 В служили аккумуляторные батареи 51Ан/280А и 60Ан/330А, как наиболее массовые по применению на современных легковых автомобилях, при напряжении 24 В — аккумуляторные батареи 6СТ190. Пусковой ток аккумуляторных батарей 51Ан/280А и 60Ан/330А равен соответственно 280 и 330 А, батареи 6СТ190 — 1150 А. 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 — нагрузка в виде электрической лампочки. Для имитации короткого замыкания проводник располагался по касательной к поверхности ленты (см. рис. 1,б) и перпендикулярно к ней (см. рис. 1,в).

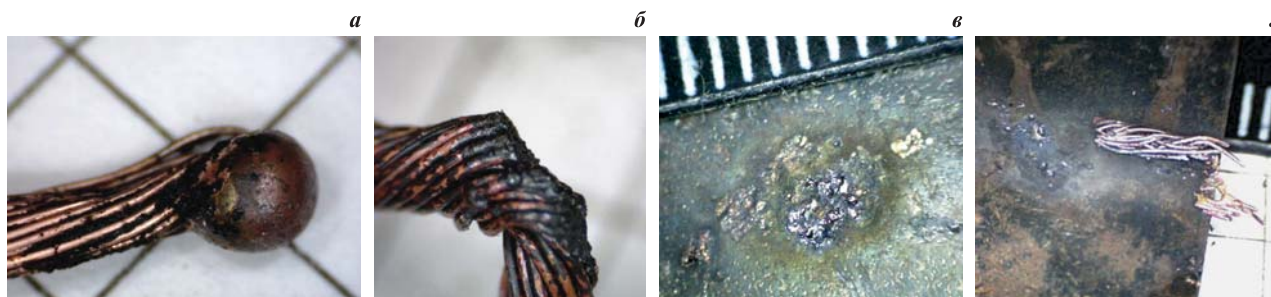
### Результаты и их обсуждение

Результаты эксперимента по имитации короткого замыкания приведены на рис. 2. Классическое шаровое оплавление было получено только в случае расположения медного провода перпендикулярно к стальной ленте при напряжении 24 В от батареи 6СТ190 (см. рис. 2,а). При использовании аккумуляторных батарей 51Ан/280А и 60Ан/330А и напряжении 12 В происходило разрушение медных проводников без образования шаровых оплавлений (см. рис. 2,б и 2,в). При перпендикулярном расположении многопроволочного провода относительно поверхности ленты происходило спекание проволок с полным выгоранием их фрагментов (см. рис. 2,б).

При касательном расположении многопроволочного проводника относительно поверхности ленты происходило сплавнение отдельных проволок друг с другом и стальной пластиной. Этот эффект был описан в работе [7] и назван залипанием. При этом в непосредственной близости от места залипания происходило разрушение проволок медного проводника с характерными признаками токовой перегрузки. На поверхности стальной ленты в случае как перпендикулярного, так и касательного расположения проводника отмечаются “кратеры” и капли расплавленного металла (см. рис. 2,в и 2,з). Необходимо также отметить, что в момент короткого замыкания нить накаливания электрической лампы, играющей роль



**Рис. 1.** Схема проведения испытаний: а — принципиальная схема (а — отрицательный вывод аккумуляторной батареи; б — положительный вывод аккумуляторной батареи;  $\Sigma$  — величина электродвижущей силы аккумуляторной батареи;  $I$  — сила тока;  $r$  — внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи;  $\Delta\phi$  — разность потенциалов;  $\vec{E}$  — напряженность электрического поля внутри аккумуляторной батареи;  $\vec{E}_3$  — электрическая сила;  $\vec{E}_{ст}$  — сторонняя сила); б — медный провод расположен по касательной к поверхности стальной ленты; в — медный провод расположен перпендикулярно к поверхности стальной ленты



**Рис. 2.** Общий вид фрагментов медного проводника и стальной ленты, подвергшихся короткому замыканию: *а* — оплавление проводника при напряжении 24 В; *б* — разрушение проводника при напряжении 12 В; *в* — повреждение стальной ленты при перпендикулярном расположении проводника относительно ее поверхности; *г* — повреждение стальной ленты при касательном расположении проводника относительно ее поверхности

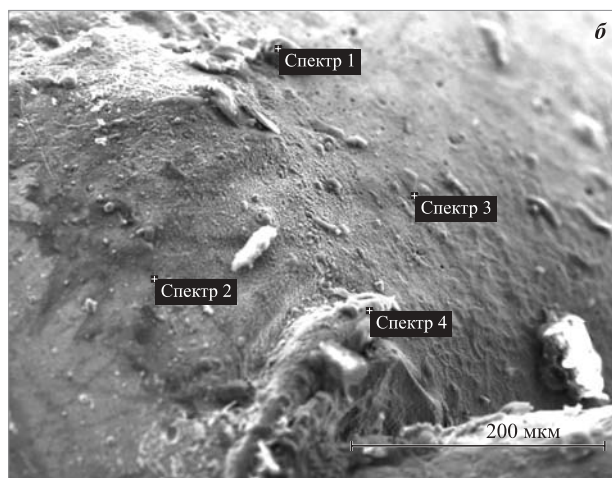


**Рис. 3.** Воздушный зазор, равный толщине изоляции провода, препятствует возникновению короткого замыкания в автомобильной электрической сети

нагрузки, переставала излучать свет. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что потребителю в момент короткого замыкания не хватает необходимой мощности для работы.

Следует также отметить, что воздушный зазор между оголенным медным проводником и стальной лентой, равный толщине изоляции проводника (в данном случае около 0,4 мм), препятствует возникновению короткого замыкания, несмотря на то что по схеме рис. 1, *а* в цепи поддерживается напряжение от аккумуляторной батареи 51Ан/280А и нить накаливания электрической лампочки излучает свет (рис. 3).

В ходе морфологического исследования фрагмента оплавленного медного проводника (см. рис. 2, *а*), подвергнутого короткому замыканию при напряже-



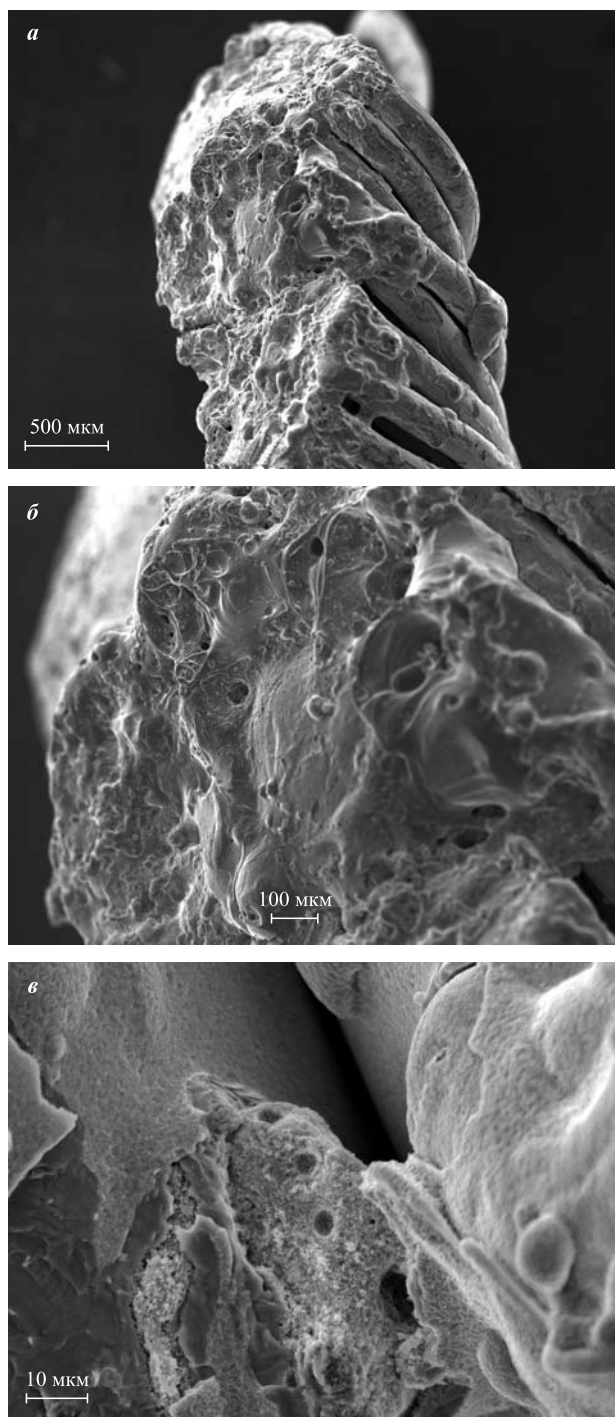
**Рис. 4.** Вид поверхности медного проводника, разрушенного в результате короткого замыкания при напряжении 24 В (см. рис. 2, *а*), при увеличении 35<sup>×</sup> (*а*) и 200<sup>×</sup> (*б*)

нии 24 В от аккумуляторной батареи 6СТ190, при помощи растрового микроскопа JSM-6390LV установлено, что, помимо микропористости, на поверхности шарового оплавления имеются химические элементы, относящиеся к составу стальной ленты (рис. 4, табл. 1).

Как следует из табл. 1, на поверхности шарового оплавления наблюдаются такие химические элементы, как Fe, Zn, Mn, присущие стальной ленте.

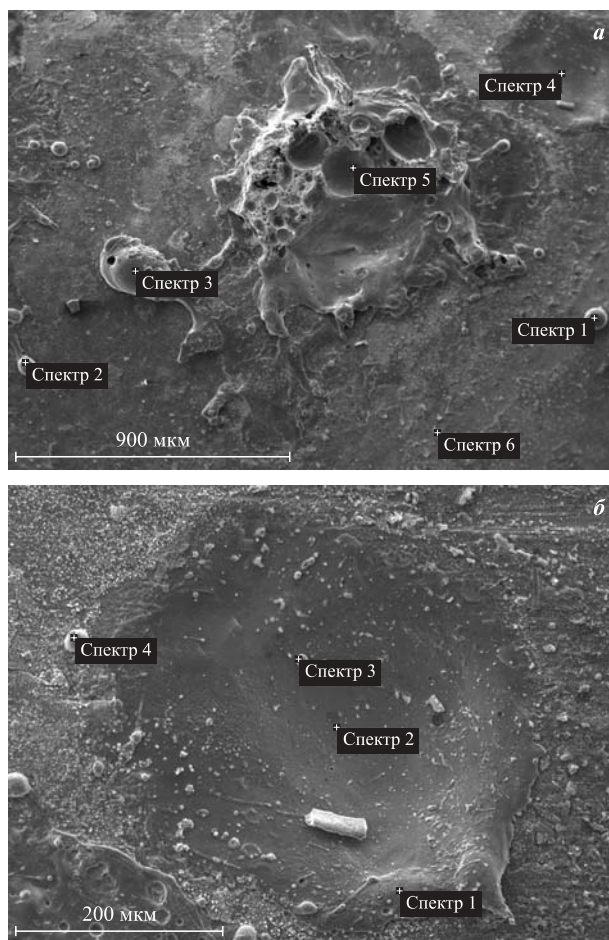
**Таблица 1.** Результаты микроанализа участка, приведенного на рис. 4, *б*

Номер точки измерения	Содержание химического элемента, % масс.						
	O	Mg	Al	Mn	Fe	Cu	Zn
Спектр 1	24,22	–	1,14	0,64	58,26	4,48	8,62
Спектр 2	29,64	1,17	1,92	–	6,66	21,18	37,10
Спектр 3	18,34	–	1,96	–	7,16	59,65	10,00
Спектр 4	1,96	–	2,88	–	–	95,16	–



**Рис. 5.** Вид поверхности медного проводника, разрушенного в результате короткого замыкания при напряжении 12 В (см. рис. 2,б), при увеличении 37<sup>х</sup> (а), 200<sup>х</sup> (б) и 1300<sup>х</sup> (в)

Причем железо на поверхности меди присутствует фрагментарно, в виде частиц шаровидной формы. Следует также отметить, что температура электродугового процесса выше температуры горения автомобиля, которая составляет около 950 °С. Таким образом, наличие на поверхности оплавленного медного проводника химических элементов, ранее ему не принадлежавших, может быть объяснено только протеканием электродугового процесса.



**Рис. 6.** Вид поверхности стальной ленты с медным проводником после короткого замыкания при напряжении 12 В (см. рис. 2,в и 2,з) при увеличении 60<sup>х</sup> (а) и 220<sup>х</sup> (б)

Исследованием разрушенного в результате короткого замыкания медного проводника при напряжении 12 В (см. рис. 2,б, рис. 5) установлено, что отдельные проводники сплавлены между собой, на оплавленной поверхности наблюдаются микропоры (см. рис. 5,б) и микролунки (см. рис. 5,в).

На рис. 6 приведены результаты исследования поверхности разрушения стальной ленты после короткого замыкания при напряжении 12 В (табл. 2).

Как следует из рис. 6,а и табл. 2, на участке короткого замыкания наблюдаются шарообразные и каплевидные частицы меди, а также фрагмент неправильной формы с лунками, состоящий из меди. На поверхности стальной ленты имеется “кратер” с ровным дном (см. рис. 6,б). Дно “кратера” на 50–72 % представляет собой железо (табл. 3), а по его краям расположены шарообразные и каплевидные частицы меди.

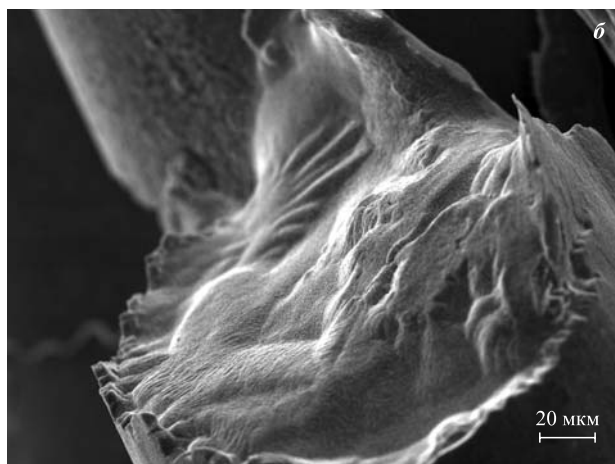
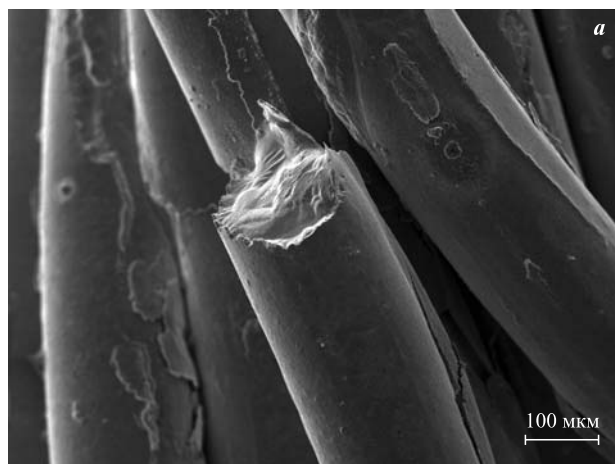
По терминологии микротрасологии перечисленные выше признаки являются микроследами, наглядно доказывающими, что причиной повреждения как стальной ленты, так и медного многопроволоч-

**Таблица 2.** Результаты микроанализа участка, приведенного на рис. 6,а

Номер точки измерения	Содержание химического элемента, % масс.						
	O	Mg	Al	Mn	Fe	Cu	Ca
Спектр 1	13,37	–	–	–	38,91	46,65	–
Спектр 2	28,90	–	–	–	51,70	17,26	–
Спектр 3	10,13	–	–	–	11,82	78,04	–
Спектр 4	19,20	–	–	–	69,59	9,91	–
Спектр 5	11,91	–	–	–	47,80	40,29	–
Спектр 6	27,73	0,69	0,80	0,36	59,35	7,50	0,38

**Таблица 3.** Результаты микроанализа участка, приведенного на рис. 6,б

Номер точки измерения	Содержание химического элемента, % масс.				
	O	Cl	Mn	Fe	Cu
Спектр 1	27,10	1,47	–	48,84	22,59
Спектр 2	15,96	1,96	–	72,17	9,92
Спектр 3	28,38	–	–	50,42	21,20
Спектр 4	23,37	2,18	0,52	48,27	25,66

**Рис. 7.** Характер излома проволоки медного проводника при токовой перегрузке при увеличении  $160\times$  (а) и  $600\times$  (б)

ного проводника послужил электродуговой процесс в виде короткого замыкания.

На рис. 2,з показано разрушение прилипшего к стальной ленте медного проводника. Если одна сторона проводника получила повреждения в результате короткого замыкания, то другая была разрушена в результате токовой перегрузки.

На поверхности разрушения проволоки медного проводника в результате токовой перегрузки отмечается ручьистый узор. Согласно РД 50-672–88 “Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Классификация видов изломов металлов” ручьистый узор — элемент строения поверхности фасеток скола, представляющий собой систему сходящихся ступенек, образующуюся в плоскости скола в результате разрушения перемычек между хрупкими микротрещинами, распространяющимися по параллельным, близко расположенным кристаллографическим плоскостям. Направление слияния ступенек скола в ручьистом узоре соответствует направлению распространения трещины. Частный случай ручьистого узора — веерообразный узор, который возникает, если ступеньки скола сходятся в одной точке в пределах фасетки. Необходимо подчеркнуть, что ручьистый узор — это признак хрупкого излома.

Исследованные образцы медных многопроволочных проводников и стальной ленты хранились 3 мес. (что превышает средний срок расследования дел о пожарах), в разных условиях (в помещении на открытом воздухе, в помещении в герметичной упаковке, в уличных условиях без доступа воды в жидком агрегатном состоянии (без погружения в воду)). При сравнении образцов установлено, что выявленные признаки являются устойчивыми и не подвержены изменениям в естественных условиях хранения (без умышленного уничтожения признаков).

Таким образом, в результате исследования методом растровой микроскопии фрагментов многопроволочного медного проводника и стальной ленты, подвергшихся короткому замыканию, установлены характерные признаки, позволяющие идентифицировать процесс, приведший к их разрушению.

В заключение необходимо отметить, что, по мнению И. Д. Чешко [10], использование результатов инструментальных исследований в качестве “промежуточного продукта” в экспертном исследовании по пожару не снижает их ценности как важнейшего источника объективной информации, без которой выводы о причине пожара будут малоубедительными.

### Заключение

Доказано, что в электрической цепи с напряжением 12 или 24 В при коротком замыкании между многопроволочным медным проводником и сталь-

ной лентой, имитирующей деталь кузова, на поверхностях разрушения могут фиксироваться признаки, в том числе массоперенос, позволяющие идентифицировать электродуговой механизм образования повреждений.

В частности, такие признаки, как “кратер” с ровным дном и расположенные по его краям шарообразные и каплевидные частицы меди на поверхности стальной кузовной детали, являются микроследами электродугового процесса.

С другой стороны, такие признаки, как микропористость, микролунки, шарообразные частицы железа на поверхности разрушения многопроволочного медного проводника, также являются признаками короткого замыкания.

Таким образом, в отличие от токовой перегрузки при коротком замыкании в автомобильной электрической сети микроследы являются парными, отображающимися как на медном проводнике, так и на кузовной детали. Указанное обстоятельство позволяет достаточно легко дифференцировать механизм разрушения медного проводника. Короткое замыкание идентифицируется по массопереносу, т. е. по наличию на поверхности оплавления медного проводника капель железа. Внешнее высокотемпературное воздействие определяется по вязкому характеру излома. В этом случае поверхность излома проволок медного проводника вблизи оплавления имеет ячеистую структуру. Токовая перегрузка характеризуется такими признаками, как отсутствие массопереноса и хрупкий характер излома. При этом на поверхности излома проволок медного проводника вблизи оплавления наблюдается ручьистый узор.

Показано, что растровую микроскопию можно использовать при исследовании оплавлений медных проводников не только в качестве вспомогательного метода, но в ряде случаев и в качестве основного.

Приведены примеры того, что короткое замыкание в автомобильной электрической сети с аккумуляторными батареями типа 51АН/280А и 60АН/330А зачастую приводит не к классическим шарообразным оплавлениям, а к залипанию, сплавлению в одну массу и выгоранию отдельных проволок медного многопроволочного проводника.

Наглядно проиллюстрированы следующие обстоятельства:

- при коротком замыкании в автомобильной электрической цепи любому потребителю (в том числе электрической лампочке) не хватает мощности для продолжения работы;
- в автомобильной электрической сети воздушного зазора между оголенным медным проводником и кузовной деталью без лакокрасочного покрытия, равного толщине изоляционного покрытия, достаточно для предотвращения короткого замыкания.

Настоящим исследованием установлено, что признаки, выявленные на поверхностях разрушения медных многопроволочных проводников, подвергшихся короткому замыканию при напряжении в электрической сети 12 или 24 В, являются устойчивыми и не подвержены изменениям в естественных условиях хранения (без умышленного уничтожения признаков).

Полученные результаты могут быть использованы при экспертном исследовании многопроволочных медных проводников, изымаемых с мест пожаров, установлении механизма их повреждения и, в конечном счете, причины пожара автомобиля. В свою очередь, 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. — 20<sup>th</sup> 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. Katsuhiko 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. Недобитков А. И. Фрактография изломов медных проводников автомобильной электрической цепи // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2016. — Т. 25, № 2. — С. 21–27. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.21-27.

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., Скодтаев С. В. Формирование электронной базы данных экспертных исследований пожаров автомобилей // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. — 2016. — № 2. — С. 61–65.
9. Селков 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.
10. Чешко И. Д. Экспертиза пожаров (объекты, методы, методики исследования). — 2-е изд., стереотип. — СПб. : СПб ИПБ МВД РФ, 1997. — 562 с.
11. Судебная экспертиза: типичные ошибки / Под. ред. Е. Р. Россинской. — М. : Проспект, 2014. — 544 с.
12. Селков Г. И. Пожарная безопасность электропроводок. — М. : ООО “Кабель”, 2009. — 328 с.
13. 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.
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. 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.
16. Babrauskas V. Arc mapping: a critical review // Fire Technology. — 2018. — Vol. 54, Issue 3. — P. 749–780. DOI: 10.1007/s10694-018-0711-5.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Murray I., Ajersch F. New metallurgical techniques applied to fire investigation // Fire & Materials 2009. — London : Interscience Communications Ltd., 2009. — P. 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. 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.

*Материал поступил в редакцию 24 марта 2018 г.*

**Для цитирования:** 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.