

А. И. НЕДОБИТКОВ, канд. техн. наук, доцент, кафедра 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

ФРАКТОГРАФИЯ ИЗЛОМОВ МЕДНЫХ ПРОВОДНИКОВ АВТОМОБИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Приведены результаты исследования на растровом электронном микроскопе JSM-6390LV образцов медных проводников электрической сети с напряжением 12 В, подвергшихся внешнему высокотемпературному воздействию, токовой перегрузке и вторичному короткому замыканию. Даны снимки поверхностей изломов медных проводников, подвергшихся воздействию тока короткого замыкания и высоких температур. Установлены характерные диагностические признаки, позволяющие идентифицировать причину повреждения при пожаре (высокотемпературное воздействие, токовая перегрузка или вторичное короткое замыкание) медных проводников в электрической цепи с напряжением 12 В. Установлено, что выявленные признаки являются устойчивыми и не подвержены изменениям в естественных условиях хранения автомобиля, поврежденного в результате термовоздействия.

Ключевые слова: короткое замыкание; токовая перегрузка; вторичное короткое замыкание; медь; растровая электронная микроскопия; медный проводник; фрактография; виды изломов; диагностический признак; пожарно-техническая экспертиза.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.21-27

Введение

Пожары причиняют значительный материальный ущерб, связанный с уничтожением или повреждением имущества, гибелью и ранением людей. Ущерб от пожаров в промышленно развитых странах превышает 1 % национального дохода и имеет тенденцию к постоянному росту [1–3]. Пожары автотранспортных средств относятся к особо тяжелым происшествиям. В частности, в промышленно развитых странах пожары автомобилей составляют от 5 до 15 % от общего числа пожаров, при этом гибель людей достигает от 6 до 12 % от общего числа погибавших при пожарах. В связи с этим проблема повышения пожарной безопасности автотранспортных средств очень актуальна [4–6].

Данное обстоятельство подтверждается мировой практикой отзыва автотранспортных средств, в частности отзыва по всему миру 6,5 млн. автомобилей в октябре 2015 г. автоконцерном “Toyota” в связи с неисправностью электростеклоподъемника, которая может привести к возгоранию автотранспортного средства. Как сообщает РИА “Новости”, отзыв коснется моделей “Vitz”, “Ractis” и “Belta” выпуска 2005–2010 гг., а также “Corolla Rumion” и “Ist” выпуска 2008–2010 гг.

По данным “Associated Press”, в октябре 2015 г. японский концерн “Mazda” отзывает по всему миру 4,9 млн. автомобилей из-за заводского брака, который может привести к перегреву и воспламенению

электроконтактов в гнезде зажигания. Речь идет о моделях “Mazda Protege”, MX-3 и MX-6, которые были произведены с 1989 по 1998 годы. И этот перечень можно продолжить.

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

По мнению автора [7], 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 указать, 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 [8]. Это можно объяснить многими причинами, в том числе отсутствием научно обоснованных методик.

Как наглядно показано автором [7], если в очаговой зоне обнаружены характерные признаки раз-

рушения токоведущих проводов, то неизбежно возникает вопрос о первичности или вторичности короткого замыкания. По мнению многих авторов, данный вопрос далеко не простой. Попытки решить его с помощью инструментальных методов криминалисты предпринимали еще в 50-х годах прошлого столетия [7].

Ряд интересных решений имеется в публикациях [9–12]. Особенно хотелось бы отметить практическую значимость работы [12], в которой на основе экспериментальных данных фактически каталогизированы различные виды аварийных режимов медных проводников, тем не менее в этой области знания еще остается много “белых пятен”.

Необходимо отметить, что в работе [7] указывается простой метод исследования — испытание медного проводника на изгиб, что позволяет выявить зоны с различной внутренней структурой. Этот метод часто используют судебные эксперты при визуальном осмотре медных проводников: если медный проводник разрушается при однократном изгибе, то он заслуживает пристального внимания.

Общеизвестно, что исследование изломов материалов занимается фрактография (от лат. *fractis* — излом) — наука о строении поверхностей разрушения [13]. В рамках этой области накоплен большой фактический материал, в частности разработаны “Методические указания. Классификация видов изломов металла” (РД 50-672–88).

В настоящей статье рассматриваются фактические примеры исследования поверхности изломов медных проводников, подвергшихся высокотемпературному воздействию, токовой перегрузке или вторичному короткому замыканию. Короткое замыкание инициировалось в месте соприкосновения разнополярных проводов или медного провода и металлической пластины при разрушении изоляции от внешнего источника по схеме 3 [6] или по схеме 2 (Direct Flame Testing Setup) [12]. Медные проводники, подвергшиеся высокотемпературному воздействию, изымались из сгоревших автомобилей, при-

чина возгорания которых не была связана с аварийным режимом электрической цепи.

Исследования проводились в Региональной университетской лаборатории инженерного профиля “ИРГЕТАС” Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева с использованием растрового электронного микроскопа JSM-6390LV. Поверхности изломов медных проводников подвергались анализу без предварительной пробоподготовки.

Визуальное исследование медных проводников

Фрагменты медных проводников, представленные на рис. 1, имеют классические признаки, описанные в работах [6, 7, 14] для случаев высокотемпературного воздействия, вторичного короткого замыкания и токовой перегрузки. Необходимо отметить, что согласно данным [15] при температурах до 100 °С на поверхности меди образуется пленка оксида меди черного цвета. При более высоких температурах скорость окисления меди значительно возрастает и на поверхности образуется пленка геммоксида меди красного цвета. В работе [15] приводятся данные по воздействию нагрева на микроструктуру меди. В частности, отмечается, что при температуре нагрева 270 °С имеет место неполная рекристаллизация, 450 °С — законченная полностью рекристаллизация, 600 °С — укрупнение зерна вследствие собирательной рекристаллизации, 1000 °С — сильное укрупнение зерна, обусловленное собирательной рекристаллизацией [15]. Общепринято считать, что среднеобъемная температура во второй фазе пожара легкового автомобиля достигает 850–950 °С, поэтому в настоящей статье под высокотемпературным воздействием подразумевается именно этот диапазон.

Так, у проводников, подвергшихся высокотемпературному воздействию (см. рис. 1, а), отмечается как наличие слоя окалины, которая не удаляется при протирании этиловым спиртом, так и разделение жил с изломом проводников при изгибе [6, 7, 14].

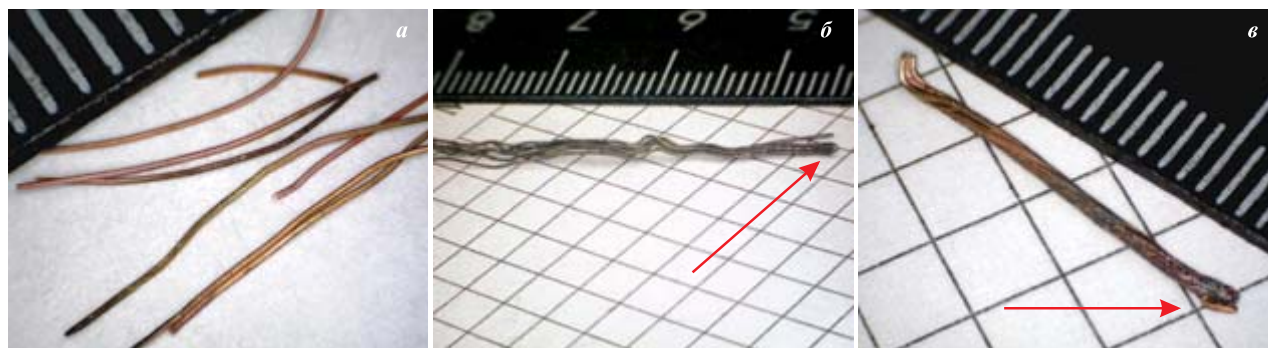


Рис. 1. Общий вид фрагментов медных проводников, подвергшихся высокотемпературному воздействию (а), вторичному короткому замыканию (б) и токовой перегрузке (в)

У проводников, подвергшихся вторичному короткому замыканию (см. рис. 1,б), имеются оплавления округлой формы, при этом сечение проводника меняется на небольшом участке вблизи оплавления [6, 7, 14]. У проводников, подвергшихся токовой перегрузке (см. рис. 1,в), отмечается спекание проволок в жиле, а зона оплавления колеблется приблизительно в пределах 10 мм, что существенно отличается от случая местного разрушения проводника при коротком замыкании. Утолщение округлой формы, как и при коротком замыкании, располагается на конце проводника, в пределах же зоны оплавления наблюдается уменьшение поперечного сечения [6, 7, 14].

Морфологический анализ методом растровой электронной микроскопии

В ходе проведения морфологического исследования образца медного проводника, подвергнутого высокотемпературному воздействию, при помощи растрового микроскопа JSM-6390LV установлено наличие на поверхности излома микрорельефа в виде ямок или сот (рис. 2).

Согласно РД 50-672–88 сотовый рельеф представляет собой микрорельеф поверхности разрушения в виде мелких плоских ямок. Указанный микрорельеф свидетельствует о малой доле локальной пластической деформации и часто встречается при разрушении литых материалов. В свою очередь, согласно РД 50-672–88 ямки — это микроуглубления на поверхности разрушения, представляющие собой вскрытые поверхности микропустот, образующихся в процессе пластического течения металла.

Согласно РД 50-672–88 вязкий излом — излом, при котором разрушение осуществляется по механизму слияния микропустот, признаком которого является наличие элементов микрорельефа в виде ямок.

Таким образом, показано, что при механическом разрушении жилы медного проводника, подвергнутого высокотемпературному воздействию, на поверхности его излома имеются признаки вязкого излома в виде сотового рельефа с деформацией отдельных сот. По терминологии микротрасологии сотовый рельеф является микроследом, наглядно доказывающим наличие внешнего высокотемпературного воздействия на исследуемый медный проводник.

При исследовании при помощи растрового микроскопа JSM-6390LV образца медного проводника, подвергнутого вторичному короткому замыканию, вблизи зоны оплавления установлено наличие раскрывшихся трещин, на внутренних стенках которых имеются микропоры (рис. 3).

Необходимо отметить, что в металлургии пористость является дефектом поверхности в виде точечных углублений, расположенных по всей поверхности, или скоплений на ее отдельных участках,

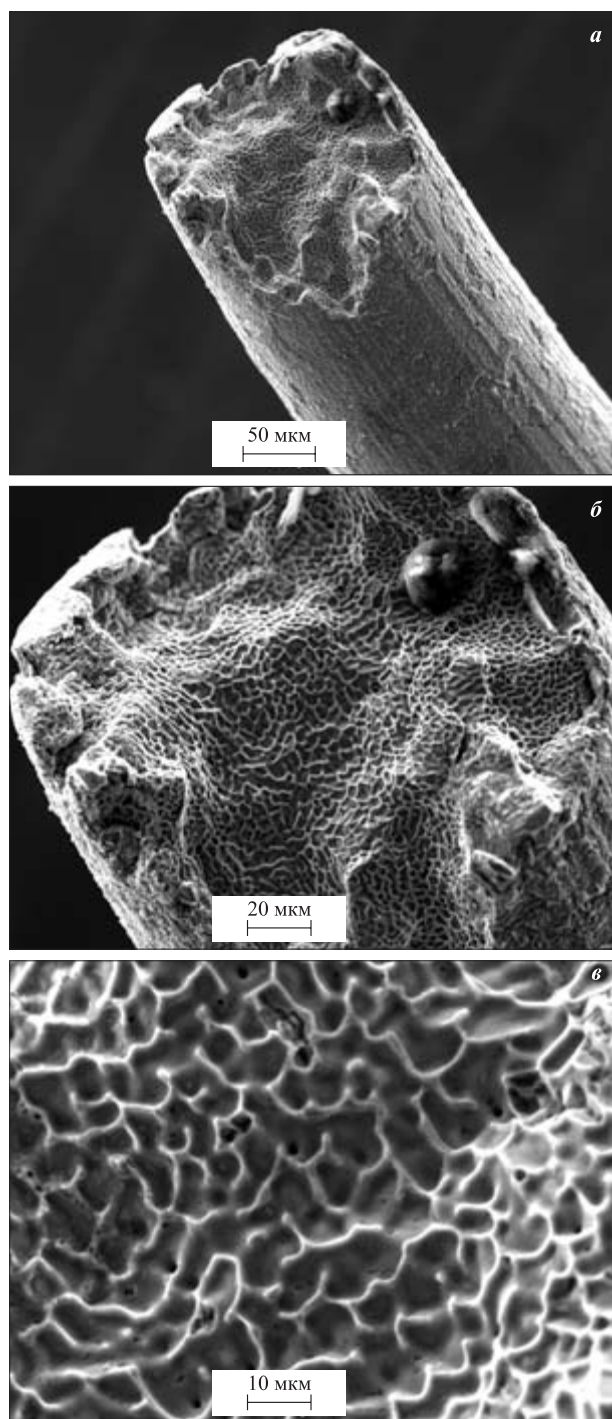


Рис. 2. Вид поверхности излома медного проводника, подвергнутого высокотемпературному воздействию при увеличении 300 $\times$ (а), 650 $\times$ (б) и 2300 $\times$ (в)

образовавшихся в результате повышенного газонасыщения металла. В свою очередь, известно, что расплавленная медь хорошо растворяет водород, который выделяется в процессе кристаллизации (при большой скорости охлаждения из-за высокой теплопроводности), вследствие чего образуется пористость.

Таким образом, показано, что при механическом разрушении жилы медного проводника, подверг-

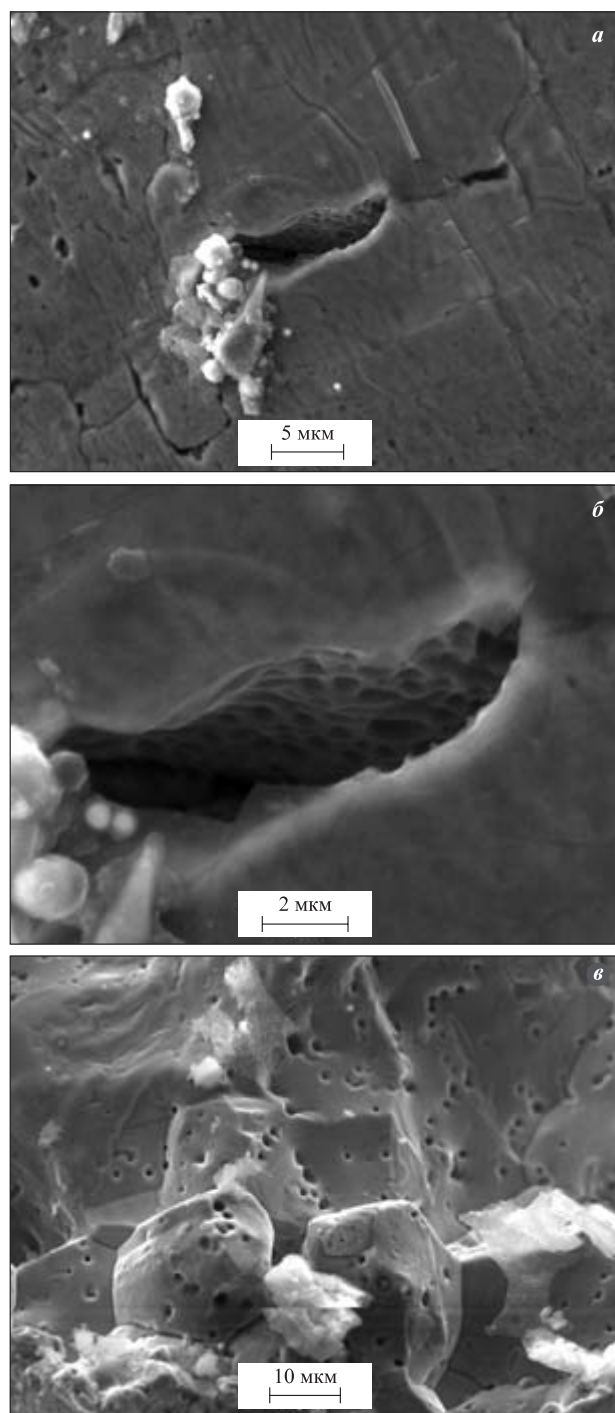


Рис. 3. Вид трещин медного проводника, подвергшегося вторичному короткому замыканию, при увеличении $3000\times$ (а), $9000\times$ (б) и вид поверхности излома при увеличении $1500\times$ (в)

шегося вторичному короткому замыканию, на поверхности его излома имеются следы в виде микропористости. По терминологии микротрасологии микропристость является микроследом, наглядно доказывающим воздействие вторичного короткого замыкания на исследуемый медный проводник.

В работе [11] приведен пример медного проводника, подвергшегося токовой перегрузке. У данного проводника вблизи области оплавления была зафик-

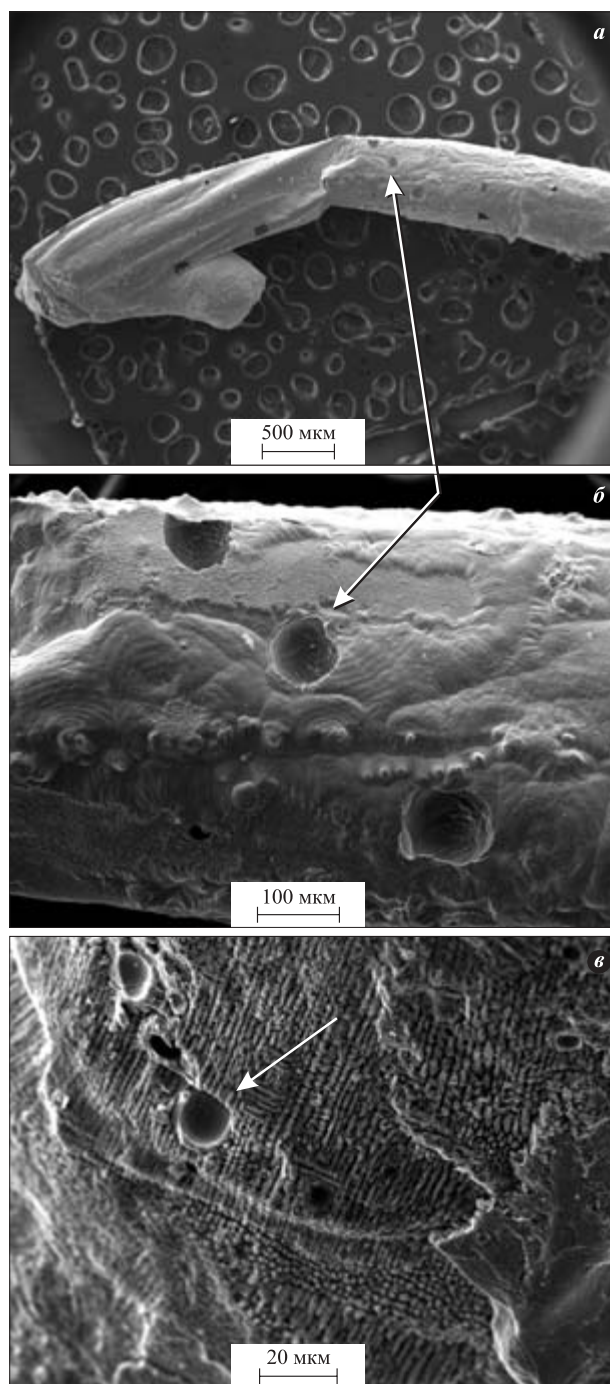


Рис. 4. Общий вид участка медного проводника, подвергшегося токовой перегрузке, с микролунками на поверхности при увеличении $30\times$ (а) и $170\times$ (б) и другого образца при увеличении $800\times$ (в)

сирована трещина. Для установления характера излома в области трещины была предпринята попытка путем приложения изгибающей нагрузки разрушить проводник. В работе [11] зафиксировано наличие на поверхности излома медного проводника, подвергшегося токовой перегрузке, зон, которые отличались по микрорельефу и имели ступеньки, что согласно РД 50-672–88 классифицирует излом как неоднородный и квазихрупкий. Автором работы [11] показано

также, что на поверхности разрушения медного проводника, подвергнувшегося перегрузке, при увеличении более $1900\times$ могут фиксироваться шарообразные микроплавления в области расположения микротрещин, что по терминологии микротрасологии является микроследом электродугового процесса.

При исследовании при помощи растрового микроскопа JSM-6390LV образцов медных проводников, подвергшихся токовой перегрузке, установлено наличие на их поверхности вблизи зоны оплавления характерных признаков в виде микролунок (рис. 4). Необходимо отметить, что микролуночки образуются в процессе токовой перегрузки при напряжении в электрической цепи не только 12 В (рис. 4,а), но и 220 В (рис. 4,в).

Таким образом, в результате исследования методом растровой микроскопии поверхностей изломов медных проводников, подвергшихся высокотемпературному воздействию, токовой перегрузке и вторичному короткому замыканию, установлены характерные признаки, позволяющие идентифицировать процесс, приведший к разрушению проводника. Необходимо отметить, что И. Д. Чешко в работе [7] указывает, что 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 на поверхности разрушения медных проводников могут фиксироваться признаки как

вязкого излома в случае внешнего высокотемпературного воздействия, так и хрупкого (квасихрупкого) излома при токовой перегрузке. На поверхности излома медного проводника, подвергнувшегося вторичному короткому замыканию, наблюдается микропористость. Методом растровой микроскопии установлены характерные признаки (наличие сотового рельефа, микропор, шарообразных микроплавлений в области микротрещин), позволяющие идентифицировать процесс, приведший к разрушению медного проводника. Установлен также такой признак токовой перегрузки, как образование микролунок на поверхности медного проводника вблизи области разрушения.

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

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

Полученные результаты могут быть использованы при экспертном исследовании медных проводников, изымаемых с мест пожаров, установлении природы 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. — 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. Богатищев А. И. Комплексные исследования пожароопасных режимов в сетях электрооборудования автотранспортных средств : дис. ... канд. техн. наук. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2002. — 269 с.
7. Чешко И. Д. Экспертиза пожаров (объекты, методы, методики исследования) — 2-е изд., стереотип. — СПб. : СПб ИПБ МВД РФ, 1997. — 562 с.
8. Судебная экспертиза: типичные ошибки / Под. ред. Е. Р. Россинской. — М. : Проспект, 2014. — 544 с.
9. 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.

10. 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.
11. 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.
12. Richard J. Roby, Jamie McAllister. Forensic Investigation Techniques for Inspecting Electrical Conductors Involved in Fire // Final Technical Report for Award No. 239052. — Columbia : Combustion Science & Engineering, Inc., 2012.
13. Фрактография и атлас фрактограмм: справ. изд. / Пер. с англ.; под ред. Дж. Феллоуза. — М. : Металлургия, 1982. — 489 с.
14. Галишев М. А., Кондратьев С. А., Чешко И. Д., Шарапов С. В., Воронова В. Б. Руководство к практическим и лабораторным занятиям по расследованию и экспертизе пожаров : учебное пособие. — СПб. : Санкт-Петербургский институт ГПС МЧС России, 2003. — 110 с.
15. Мальцев М. В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Металлургия, 1970. — 364 с.
16. Недобитков А. И. Исследование жил медных проводников, находившихся в режиме перегрузки // Промышленность Казахстана. — 2015. — № 2. — С. 34–37.

Материал поступил в редакцию 2 декабря 2015 г.

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

English

FRACTOGRAPHY OF CAR ELECTRIC CIRCUIT COPPER CONDUCTOR FRACTURES

NEDOBITKOV A. I., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Informatics and Mathematics, Kazakh Humanitarian Law Innovative University (Astana St., 48, Ust-Kamenogorsk, 070014, Kazakhstan; e-mail address: a.nedobitkov@mail.ru)

ABSTRACT

Data shown in the article give evidence that car fires refer to extremely serious accidents, therefore the problem of car fire safety enhancement is very topical.

In this connection development of measures for car fire prevention is of great importance. One of preventive measures is fire investigation.

In the article it is stated that them majority of conclusions of expert fire engineers regarding technical reasons for car fires has presumable (probable) nature which does not allow developing and implementing exact engineering solutions. This may be explained by many reasons including absence of scientifically based methods.

In particular, the problem of identifying primary, secondary short circuit or current overload in fusing copper conductor is not clearly solved, even though attempts to solve this problem using instrumental methods were made by criminalists starting from the 50^s of the last century.

The article gives results of studying fracture surfaces of copper conductors exposed to high-temperature, secondary short circuit and current overload. To conduct study we used raster electronic microscope JSM-6390LV.

It has been proved that on the fractures surface of copper conductors specific features for such as high temperature, secondary short circuit, current overload may occur in form of cell-type relief, microporosity, appearance ball-shaped microfusion around microcracks, steps on the fracture surface. Identification of such features allows identifying reason for destruction of copper conductor in case of fire and significantly simplifying determination of fire reason.

It is found that the determined reasons are stable and not subject to changes in natural conditions of storing thermally damaged car.

Data given in the article may be used by specialists in expert investigation of 12 V electric circuit copper conductors taken from fire locations, in identification of damage nature and, finally, in determination of car fire root cause.

Keywords: short circuit; current overload; secondary short circuit, copper; raster electronic microscopy; copper conductor; fractography: fracture types; diagnostic feature; fire investigation.

REFERENCES

1. Brushlinskiy N. N., Sokolov S. V., Wagner P. *Chelovechestvo i pozhary* [Humanity and fires]. Moscow, IPTs Maska Publ., 2007. 142 p.
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, pp. 301–310. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.07.001.
6. Bogatishchev A. I. *Kompleksnyye issledovaniya pozharoopasnykh rezhimov v setyakh elektrooborudovaniya avtotransportnykh sredstv. Dis. kand. tekhn. nauk* [Comprehensive research of fire hazardous modes in mains of electrical equipment of vehicles. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2002. 269 p.
7. Cheshko I. D. *Ekspertiza pozharov (obyekty, metody, metodiki issledovaniya)* [Examination of fire (objects, methods, methods of research)]. St. Petersburg, St. Petersburg Institute of Fire Safety of Ministry of the Interior of Russian Federation Publ., 1997. 562 p.
8. Rossinskaya E. R. (ed). *Sudebnaya ekspertiza: tipichnyye oshibki* [Judicial examination: typical mistakes]. Moscow, Prospekt Publ., 2014. 544 p.
9. 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.
10. 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, pp. 125–147. DOI: 10.1177/1042391504036450.
11. 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.
12. Richard J. Roby, Jamie McAllister. Forensic Investigation Techniques for Inspecting Electrical Conductors Involved in Fire. *Final Technical Report for Award No. 239052*. Columbia, Combustion Science & Engineering, Inc., 2012.
13. Fellows J. (ed.) *Metals Handbook. Fractography and atlas of fractographs*. 8th ed. American Society for Metals, 1974. (Russ. ed.: Bernshtein M. L. Fraktografiya i atlas fraktogramm. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982. 489 p.).
14. Galishev M. A., Kondratyev S. A., Cheshko I. D., Sharapov S. V., Voronova V. B. *Rukovodstvo k prakticheskim i laboratornym zanyatiyam po rassledovaniyu i ekspertize pozharov* [Guide to practical and laboratory studies to investigate and expertise fires]. St. Petersburg, St. Petersburg Institute of State Fire Service of Emercom of Russia Publ., 2003. 110 p.
15. Maltsev M. V. *Metallografiya promyshlennykh tsvetnykh metallov i splavov* [Metallography of industrial non-ferrous metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 364 p.
16. Nedobitkov A. I. *Issledovaniye zhil mednykh provodnikov, nakhodivchikhsya v rezhime peregruzki* [The investigation of copper conductors that are in overload mode]. *Promyshlennost Kazakhstana — Industry of Kazakhstan*, 2015, no. 2. pp. 34–37.

For citation: Nedobitkov A. I. Fraktografiya izlomov mednykh provodnikov avtomobilnoy elektricheskoy tsepi [Fractography of car electric circuit copper conductor fractures]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 2, pp. 21–27. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.21-27.