

Исследование микротвердости медного проводника автомобильной электрической сети, подвергшегося токовой перегрузке

© А. И. Недобитков✉

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

РЕЗЮМЕ

Введение. Приведенные в статье данные наглядно показывают насущную необходимость обеспечения пожарной безопасности автотранспортных средств. Целью статьи является обоснование применения метода измерения микротвердости при исследовании медного проводника, подвергшегося токовой перегрузке и внешнему высокотемпературному воздействию, 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, а также микротвердомера DuraScan 20.

Результаты и их обсуждение. Экспериментально доказано, что микротвердость медного проводника, подвергшегося токовой перегрузке, и медного проводника, подвергшегося внешнему высокотемпературному воздействию, существенно различаются. Даны снимки участков измерения микротвердости медного проводника, подвергшегося воздействию сверхтока. Приведены результаты энергодисперсионного анализа и характерные диагностические признаки, позволяющие идентифицировать причину повреждения медного проводника при пожаре (высокотемпературный отжиг или токовая перегрузка). Установлено, что выявленные признаки являются устойчивыми и не подвержены изменениям в естественных условиях хранения автомобиля.

Выводы. Предложен метод дифференциации повреждения медного проводника при пожаре (токовая перегрузка, внешнее высокотемпературное воздействие). Показано также, что метод измерения микротвердости можно использовать при исследовании фрагментов медных проводников в качестве вспомогательного к основному методу исследования — растровой микроскопии. 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; сверхток; медь; растровая электронная микроскопия; диагностический признак; пожарно-техническая экспертиза; микротвердомер.

Для цитирования: Недобитков А. И. Исследование микротвердости медного проводника автомобильной электрической сети, подвергнутого токовой перегрузке // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2020. — Т. 29, № 2. — С. 17–25. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.02.17-25.

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

Study of microhardness of a copper conductor subjected to current overload in vehicle electric mains

© 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 clearly demonstrate the urgent need to ensure fire safety of vehicles. The aim of the article is to justify the use of measuring microhardness method in fire-technical expertise of a copper conductor subjected to current overload and external high-temperature impact to determine the cause of its damage.

Materials and methods. The studies were carried out with a JSM-6390LV scanning electron microscope with an add-on device for energy dispersive microanalysis as well as a DuraScan 20 microhardness tester.

Results and discussion. It has been experimentally proved that the microhardness of a copper conductor subjected to current overload differs significantly from the microhardness of a copper conductor subjected to an external high-temperature impact. Pictures of microhardness measurement sites of a copper conductor subjected to overcurrent are given in the article. The study presents the results of energy dispersive analysis and characteristic

diagnostic features which make it possible to identify the cause of damage to the copper conductor in fire (high temperature annealing or current overload). It has been found that the identified signs are stable and not subject to changes in the natural conditions of car storage.

Conclusion. A method for differentiating damage to a copper conductor in case of fire (current overload, external high-temperature effect) has been proposed in the article. It is also shown that the method of measuring microhardness can be used in examination of copper conductor fragments as an auxiliary method to the main examination method — scanning microscopy. The data presented in the article can be used by experts in expert studies of copper conductors taken from fire sites to determine the mechanism of their damage and, ultimately, the cause of a vehicle fire.

Keywords: fire; overcurrent; copper; scanning electron microscopy; diagnostic sign; fire-technical expertise; microhardness tester.

For citation: A. I. Nedobitkov. Study of microhardness of a copper conductor subjected to current overload in vehicle electric mains. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 2, pp. 17–25 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2020.29.02.17-25.

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

Введение

Пожары, представляя собой тяжелую чрезвычайную ситуацию (ЧС), наносят значительный ущерб экономике государств [1–3].

Авторами работ [4–14] показано, что при исследовании сгоревшего автотранспортного средства практически всегда рассматривается так называемая “электрическая” версия возникновения пожара. В работах [15–17] отмечается динамика роста пожаров на электромобилях, анализируются некоторые причины и условия их возникновения. Таким образом, в ближайшем будущем в качестве основных версий причины пожара на автомобиле будут рассматриваться техническое состояние его электрической сети и наличие тех или иных производственных дефектов.

В то же время авторами [18–20] критически анализируются результаты практического применения представленных в работах [21–29] методик, результатов исследований и подчеркивается необходимость совершенствования или разработки новой методики исследования оплавлений медных проводников, изымаемых с мест пожаров. Ввиду этого некоторые эксперты отказываются от применения отдельных методических указаний. Так, например, эксперты Воронежского регионального центра судебных экспертиз, выполняя повторную комплексную экспертизу, в Заключении эксперта № 9667/7-2; № 9668/3-2 от 21.02.2020 г. указали, что не могут исследовать два предоставленных в качестве объекта исследования шлифа медных проводников с оплавлениями, так как методика “не сертифицирована” Российским федеральным центром судебной экспертизы. Известны также случаи, когда по ряду причин утрачиваются оплавления медных проводников при сохранности остальной электрической цепи и формально решить вопрос о причине их образования в категоричной форме не представляется возможным.

Следует напомнить, что в электрической сети автотранспортных средств применяется постоянный

ток, который обладает специфическими свойствами. Например, специалисты компании Lapp GmbH пришли к выводу, что использование постоянного тока сопряжено с определенными трудностями, связанными с его контролем и управлением. В частности, они отмечают, что при переменном токе дуга гаснет сама, если коннектор отсоединен при нагрузке, а при постоянном токе она остается и может привести к значительным повреждениям. Поэтому специалисты компании Lapp GmbH для решения этой проблемы считают необходимым разработку специальных выключателей и штепсельных разъемов, обеспечивающих гашение дуги. Выводы специалистов этой компании подтверждаются практикой эксплуатации электромобилей и отзывной кампанией, проведенной в 2014 г. американским производителем Tesla Motors. В ходе этой акции было заменено 29 тыс. зарядных устройств для машин по причине дефекта, ведущего к перегреву, что может послужить причиной пожара.

Профессор Ф. Бергер из TU Ilmenau также обнаружил, что диэлектрическая прочность кабелей для постоянного тока (в отличие от кабелей переменного тока) зависит от температуры. На сегодняшний день это явление не изучено вообще. Особенности протекания электродуговых процессов в автомобильной электрической сети отмечаются в работах [12, 14].

Целью настоящей работы является разработка научно обоснованного метода исследования медного проводника, подвергшегося токовой перегрузке или внешнему высокотемпературному воздействию. Под внешним высокотемпературным воздействием в настоящей работе понимается температура 850–950 °С, что соответствует среднеобъемной температуре во второй фазе пожара на легковом автомобиле.

Исходя из этого были поставлены следующие задачи исследования:

- показать, что процессы, происходящие в медном проводнике при токовой перегрузке и внешнем

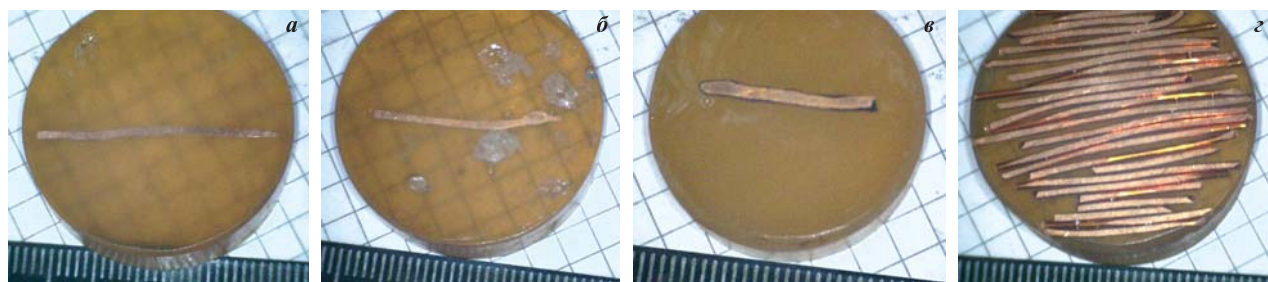


Рис. 1. Общий вид образцов исследования: *a* — высокотемпературный отжиг; *б* — токовая перегрузка с оплавлением; *в* — токовая перегрузка без оплавления; *г* — исходное состояние электротехнической проволоки

Fig. 1. General view of research samples: *a* — high temperature annealing; *b* — current overload with reflow; *v* — current overload without reflow; *g* — initial state of the electrical wire

тепловом воздействии, приводят к изменению его структуры;

- экспериментально доказать, что изменение структуры медного проводника при токовой перегрузке или внешнем высокотемпературном воздействии может быть зафиксировано с помощью метода измерения микротвердости;
- экспериментально подтвердить, что микротвердость медного проводника, подвергшегося токовой перегрузке до режима фрагментации, различна по его длине;
- подтвердить предположение, что микротвердость фрагмента медного проводника, подвергшегося протеканию сверхтока, является стабильной и не подвержена изменениям в естественных условиях хранения образцов (без умышленного внесения изменений).

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, а также на микротвердомере DuraScan 20. Для исследования были изготовлены аншлифы медных проволок.

В настоящей работе проводилось измерение микротвердости следующих образцов:

а) фрагмента провода массы автомобиля, загоревшегося на стоянке при поджоге (высокотемпературный отжиг) (рис. 1, *a*);

б) фрагмента медного проводника, подвергшегося токовой перегрузке и имеющего оплавление (рис. 1, *б*);

в) фрагмента медного проводника, подвергшегося токовой перегрузке и не имеющего оплавлений (рис. 1, *в*);

г) фрагмента электротехнической проволоки в исходном состоянии (рис. 1, *г*).

Все образцы заливались в эпоксидную смолу и подвергались шлифовке, при этом многопроволочные проводники разделялись на отдельные проводочки (см. рис. 1). Измерения выполнялись с соблюдением общих требований ГОСТ 9450–76 “Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников”.

Результаты и их обсуждение

Общеизвестно, что метод измерения микротвердости является единственным методом, который позволяет определить твердость фаз и структурных составляющих металлов и многокомпонентных сплавов. В работах [30, 31] на основе экспериментов по отжигу кислородосодержащей меди в диапазоне температур 300–700 °С получены данные по изменению механических свойств металла, а также эволюция изменения текстуры в ходе волочения медной проволоки. Таким образом, доказано, что на разных этапах изготовления медная электротехническая проволока имеет различную текстуру и, соответственно, обладает разными механическими свойствами.

В работе [10] отмечается, что при перегрузке кратностью более 3–4 в многопроволочном проводнике наблюдалось расплавление отдельных участков проволок, при этом участки расплавления существенно отличались по структуре от нерасплавленных проволок. Причиной этого являлось окисление меди и, как следствие, образование доэвтектической, эвтектической или реже — заэвтектической структуры. Микроструктура нерасплавленных проволок, как правило, имела крупные зерна меди с двойниками отжига внутри, образовавшимися в результате нагрева при протекании тока перегрузки по проводнику [10].

Автором [10] показано, что протекание сверхтока по проводнику вызывает в пределах оплавления образование зерен меди различной формы и ориентировки к поверхности оплавления, в частности могут наблюдаться зерна дендритной, столбчатой и равноосной формы.

В работе [10] также доказано, что отжиг при температурах 800–900 °С в течение 20 и 40 мин не вызывает значительных изменений в форме дендритных зерен, наблюдается лишь укрупнение равноосных зерен меди с появлением двойников отжига внутри. Повышение температурного воздействия до 1000 °С сопровождается исчезновением дендритной структуры с нивелированием преимущественной ориентировки и значительным укрупнением равноосных зерен меди, по размерам сопоставимых с сечением проводника.

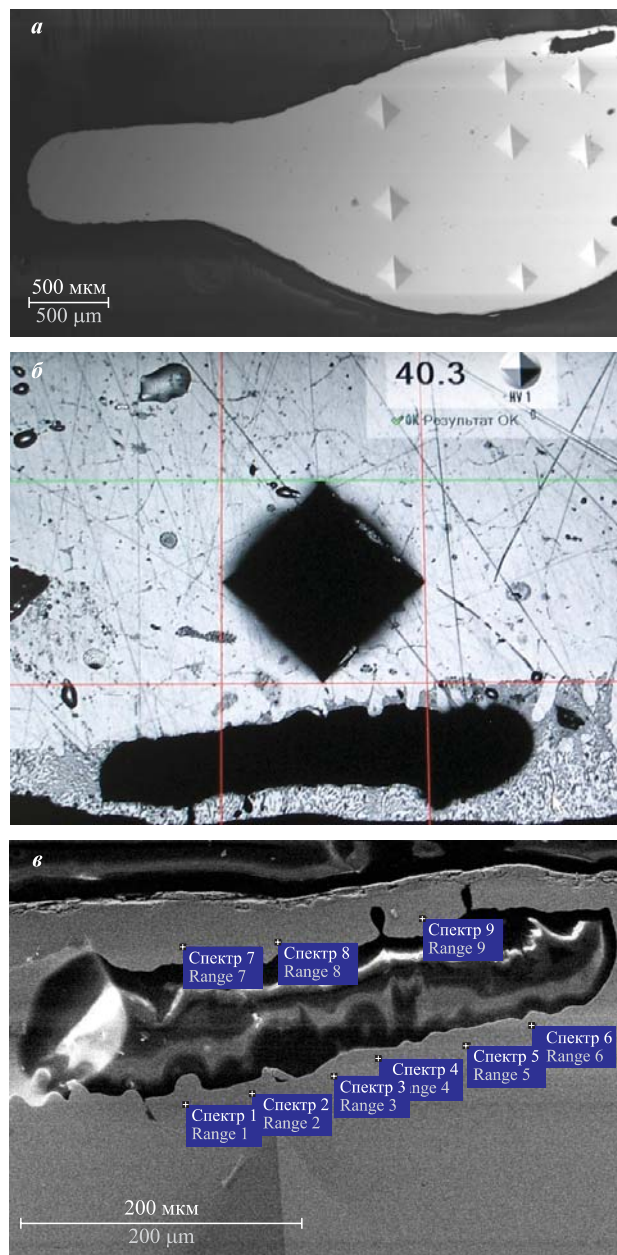


Рис. 2. Образец на рис. 1, б: а — общий вид, увеличение 35×; б — измерение микротвердости в области поры; в — точки микроанализа в области поры

Fig. 2. Sample on Fig. 1, b: a — general view, increase of 35×; b — measurement of microhardness in the pore area; v — microanalysis points in the pore area

Таким образом, течение сверхтока по медному проводнику вызывает образование различных структур, что хорошо согласуется с данными работы [14], в которой экспериментально доказано, что температура в случае токовой перегрузки распределяется по проводнику неравномерно. Резюмируя изложенное, можно сделать вывод, что именно многообразие структур, образующихся при протекании сверхтока по медному проводнику или его отжиге в диапазоне температур 300–700 °С, затрудняет применение действующей методики [18, 19].

Сечение фрагмента провода массы автомобиля, подвергнутого высокотемпературному отжигу, составляет 19,625 мм². Для измерения микротвердости выбирались проволоочки как с наружной стороны, так и из середины многопроволочного проводника. Микротвердость наружных проволоочек составила HV 61,7, внутренних — до HV 77,6. Исследованием образца, подвергнутого токовой перегрузке и имеющего оплавление (см. рис. 1, б), установлено, что он обладает пористостью, причем среди пор выделяется одна крупная пора, прилегающая к поверхностному слою (рис. 2). Схема измерения микротвердости показана на рис. 2, а.

Как следует из табл. 1, в точках измерения 7, 8 и 9, прилегающих к наружной поверхности проводника, отмечается повышенное содержание кислорода. Указанное обстоятельство соответствует выводам работы [10], в которой отмечается, что у проводника, подвергнутого токовой перегрузке, приповерхностный слой состоит из зерен дендритной формы при содержании кислорода порядка 0,2 %.

Как следует из рис. 2, б и рис. 3, а, микротвердость на внутреннем участке составляет HV 40,3–41,1, в то время как на участках оплавления с повышенным содержанием кислорода она достигает HV 51–58,4.

Таблица 1. Результаты микроанализа участка на рис. 2, в

Table 1. The results of the microanalysis of the section shown on Fig. 2, v

Точка измерения Measurement point	Содержание химического элемента, % масс. / Content of chemical element, % by mass	
	O	Cu
Спектр 1 / Range 1	1,81	98,19
Спектр 2 / Range 2	2,83	97,17
Спектр 3 / Range 3	1,65	98,35
Спектр 4 / Range 4	2,44	97,56
Спектр 5 / Range 5	1,84	98,16
Спектр 6 / Range 6	2,18	97,82
Спектр 7 / Range 7	6,26	93,74
Спектр 8 / Range 8	75,38	24,62
Спектр 9 / Range 9	34,53	65,47

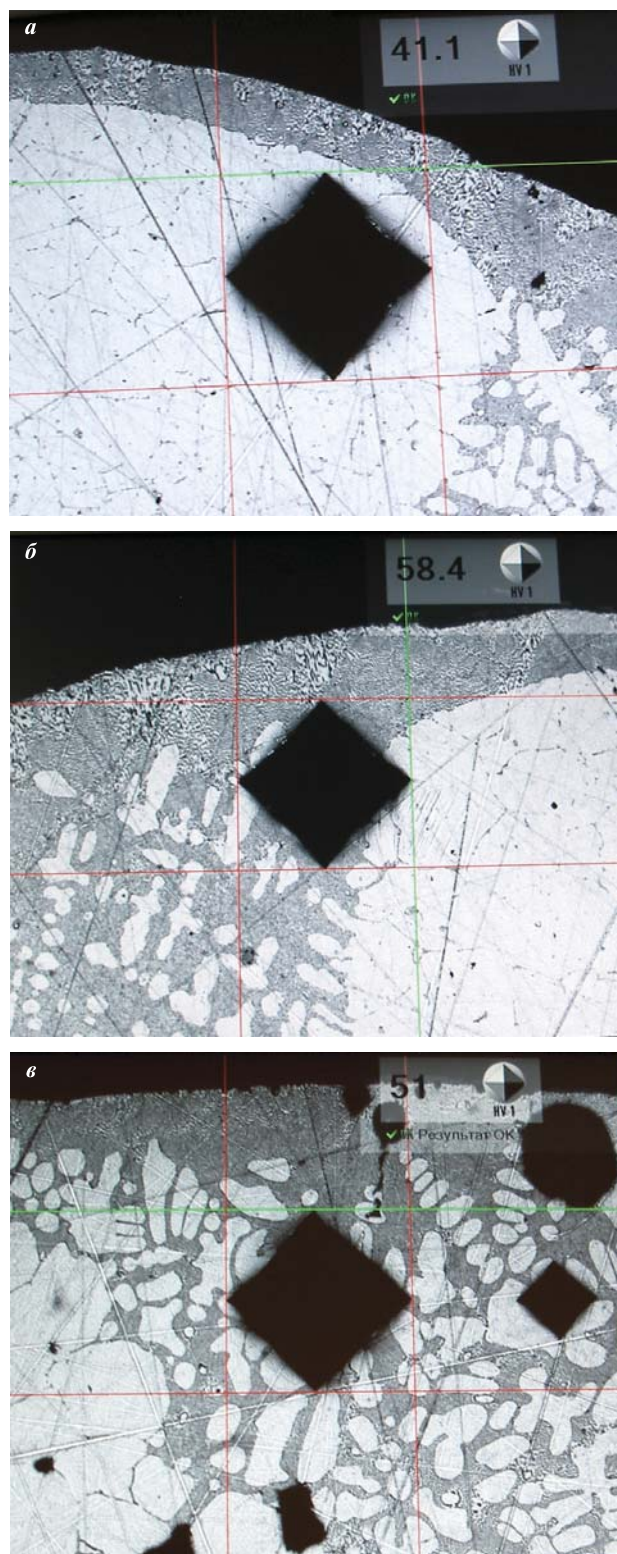


Рис. 3. Измерение микротвердости образца на рис. 1, *б*: *а* — внутренний участок; *б*, *в* — участки оплавления
Fig. 3. Measuring the microhardness of a sample on Fig. 1, *b*: *a* — inner section; *b*, *v* — areas of reflow

Исследованием образца, подвергнутого токовой перегрузке и не имеющего оплавлений (см. рис. 1, *в*), установлено, что он обладает пористостью в приповерхностном слое (см. рис. 4, *а*).

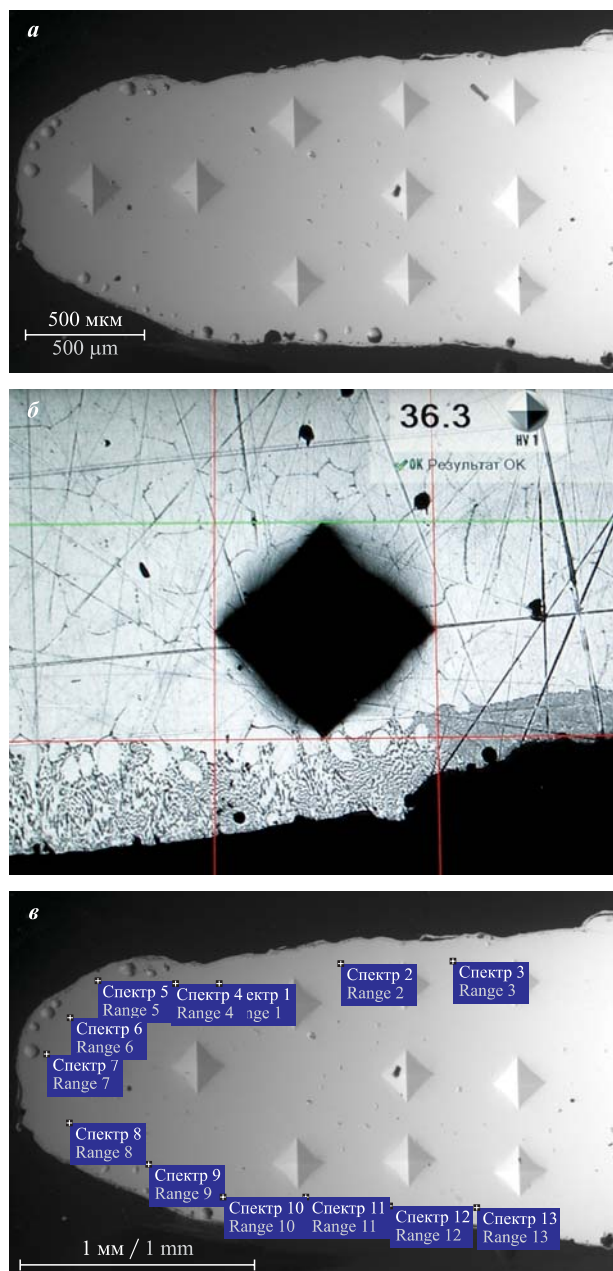


Рис. 4. Образец на рис. 1, *в*: *а* — общий вид, увеличение 50 $\times$; *б* — измерение микротвердости; *в* — точки микроанализа
Fig. 4. Sample on Fig. 1, *v*: *a* — general view, increase of 50 $\times$; *b* — measurement of microhardness; *v* — microanalysis points

Как следует из табл. 2, в точках измерения 4, 5, 6 и 7, прилегающих к наружной поверхности проводника, отмечается повышенное содержание кислорода. Указанное обстоятельство также соответствует выводам работы [10]: у проводника, подвергнутого токовой перегрузке, приповерхностный слой состоит из зерен дендритной формы при содержании кислорода порядка 0,2 %.

Как следует из рис. 4, *б*, микротвердость на внутреннем участке составляет HV 36,3. Таким образом, у проводников, подвергшихся токовой перегрузке, имеется характерная особенность: микро-

Таблица 2. Результаты микроанализа участка на рис. 4,в
Table 2. The results of the microanalysis of the section shown on Fig. 4,в

Точка измерения Measurement point	Содержание химического элемента, % масс. / Content of chemical element, % by mass	
	O	Cu
Спектр 1 / Range 1	1,05	98,95
Спектр 2 / Range 2	1,73	98,27
Спектр 3 / Range 3	1,67	98,33
Спектр 4 / Range 4	3,24	96,76
Спектр 5 / Range 5	2,72	97,28
Спектр 6 / Range 6	3,79	96,21
Спектр 7 / Range 7	2,74	97,26
Спектр 8 / Range 8	1,93	98,07
Спектр 9 / Range 9	1,32	98,68

твердость на внутренних участках существенно ниже, чем на оплавленных или приповерхностных участках.

Необходимо отметить, что микротвердость медного проводника, подвергнутого токовой перегрузке, на участке, удаленном от места оплавления или фрагментации [10], составляет HV 56–58. Таким образом, микротвердость медного проводника, подвергнутого токовой перегрузке до режима фрагментации, различна по его длине, что полностью соответствует данным [14].

Необходимо также подчеркнуть, что микротвердость провололок многопроволочного проводника, подвергнутого высокотемпературному внешнему воздействию, различается в зависимости от места расположения — снаружи или в центре проводника. Указанная особенность является характерным признаком высокотемпературного отжига, поскольку при токовой перегрузке все провололки многопроволочного проводника без оплавлений имеют близкую по величине микротвердость. Микроструктура провололок соответствует данным [30, 31].

Измерением микротвердости фрагмента электротехнической проволоки в исходном состоянии (см. рис. 1,з) установлено, что она находится в диапазоне HV 73,8–78,2.

Исследованные образцы подверглись повторно измерению микротвердости после 2 мес. хранения при комнатной температуре. Полученные результаты в пределах погрешности измерений соответствовали первичным.

Таким образом, при исследовании фрагментов медных проводников, изымаемых с мест пожаров, в качестве основного метода исследования можно

применять растровую микроскопию, а в качестве вспомогательного — метод измерения микротвердости, поскольку, во-первых, видна микроструктура, а во-вторых, определяются показатели, численно характеризующие протекающий процесс.

В ходе дальнейшего исследования возможно создание справочных таблиц, показывающих зависимость микротвердости от конкретных режимов токовой перегрузки или внешнего высокотемпературного воздействия.

Выводы

Показано, что процессы, происходящие в медном проводнике при токовой перегрузке и внешнем тепловом воздействии, приводят к изменению его структуры.

Экспериментально доказано, что изменение структуры медного проводника при токовой перегрузке или внешнем высокотемпературном воздействии может быть зафиксировано методом измерения микротвердости.

Установлено, что у медных проводников, подвергнувшихся токовой перегрузке, микротвердость на внутренних участках существенно ниже, чем на оплавленных или приповерхностных участках.

Экспериментально показано, что микротвердость медных проводников, подвергнувшихся высокотемпературному внешнему воздействию, больше, чем у проводников, подвергнувшихся токовой перегрузке.

Экспериментально подтверждено, что микротвердость медного проводника, подвергнутого токовой перегрузке до режима фрагментации, различна по его длине.

Показано также, что метод измерения микротвердости можно использовать при исследовании фрагментов медных проводников в качестве вспомогательного к основному методу исследования — растровой микроскопии.

Настоящим исследованием подтверждено, что микротвердость фрагмента медного проводника, подвергнутого протеканию сверхтока или внешнему высокотемпературному воздействию, является стабильной и не подвержена изменениям в естественных условиях хранения образцов (без умышленного внесения изменений).

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 разрабатывать профилактические мероприятия и 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., 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., Скودтаев 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., 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., Скودтаев 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., 2018. — 140 с.
11. *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.
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. *Смелков Г. И.* Пожарная безопасность электропроводок. — М. : ООО “Кабель”, 2009. — 328 с.
14. *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.
15. *Колчин В. В., Крутолапов А. С.* Пожарная безопасность электромобилей // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. — 2018. — Т. 1, № 9. — С. 417–419.
16. *Lazarenko O., Loik V., Shtain B., Riegert D.* Research on the fire hazards of cells in electric car batteries // BITP. — 2018. — Vol. 52, No. 4. — P. 108–117. DOI: 10.12845/bitp.52.4.2018.7.
17. *Larsson F., Andersson P., Mellander B.-E.* Lithium-ion battery aspects on fires in electrified vehicles on the basis of experimental abuse tests // Batteries. — 2016. — Vol. 2, No. 2. — 13 p. DOI: 10.3390/batteries2020009.
18. *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.
19. *Таубкин И. С., Саклантний 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.
20. *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.
21. *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.
22. *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.

23. 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.
24. Babrauskas V. Arc mapping: a critical review // *Fire Technology*. — 2018. — Vol. 54, Issue 3. — P. 749–780. DOI: 10.1007/s10694-018-0711-5.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. Murray I., Ajersch F. New metallurgical techniques applied to fire investigation // *Fire & Materials* '2009. — London : Interscience Communications Ltd., 2009. — P. 857–869.
29. Carey N. J. Developing a reliable systematic analysis for arc fault mapping : Ph. D. Diss. — Strathclyde, United Kingdom : University of Strathclyde, 2009.
30. Loginov Yu. N., Demakov S. L., Ivanova M. A., Illarionov A. G., Karabanalov M. S., Stepatov S. I. Effect of annealing on properties of hot-rolled electrical copper // *The Physics of Metals and Metallography*. — 2015. — Vol. 116, No. 4. — P. 393–400. DOI: 10.1134/S0031918X1502009X.
31. Demakov S. L., Loginov Yu. N., Illarionov A. G., Ivanova M. A., Karabanalov M. S. Effect of annealing temperature on the texture of copper wire // *The Physics of Metals and Metallography*. — 2012. — Vol. 113, No. 7. — P. 681–686. DOI: 10.1134/S0031918X12070046.

REFERENCES

1. N. N. Brushlinskiy, S. V. Sokolov. How much is the fire “cost” in the modern world? *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 1, pp. 79–88 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.79-88.
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. 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, 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, 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, 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. *Pozharovzryvobezopasnost/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. A. I. Nedobitkov. Peculiarities of current overload in the car electric network. *Pozharovzryvbezopasnost/ Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 4, pp. 42–50 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.42-50.
15. V. V. Kolchin, A. S. Krutolapov. Fire safety of electric vehicles. *Pozharnaya bezopasnost: problemy i perspektivy / Fire Safety: Problems and Prospects*, 2018, vol. 1, no. 9, pp. 417–419 (in Russian).
16. O. Lazarenko, V. Loik, B. Shtain, D. Riegert. Research on the fire hazards of cells in electric car batteries. *BiTP*, 2018, vol. 52, no. 4, pp. 108–117. DOI: 10.12845/bitp.52.4.2018.7.
17. F. Larsson, P. Andersson, B.-E. Mellander. Lithium-ion battery aspects on fires in electrified vehicles on the basis of experimental abuse tests. *Batteries*, 2016, vol. 2, no. 2, 13 p. DOI: 10.3390/batteries2020009.
18. I. D. Cheshko, A. Yu. Mokryak, A. V. Mokryak. Evolution of the methodology of distinguishing “victim” from “cause” beads of copper conductors by short circuit. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2018, no. 3, pp. 39–45 (in Russian). DOI: 10.24411/2218-130x-2018-00047.
19. I. S. Taubkin, A. R. Saklantiy. Methodological resources for investigating the failure status of electrical wiring with copper conductors as the cause of fire. *Teoriya i praktika sudebnoy ekspertizy / Theory and Practice of Forensic Science*, 2018, vol. 13, no. 3, pp. 38–46 (in Russian). DOI: 10.30764/1819-2785-2018-13-3-38-46.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. V. Babrauskas. Arc mapping: a critical review. *Fire Technology*, 2018, vol. 54, issue 3, pp. 749–780. DOI: 10.1007/s10694-018-0711-5.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. I. Murray, F. Ajersch. New metallurgical techniques applied to fire investigation. In: *Fire & Materials '2009*. London, Interscience Communications Ltd., 2009, pp. 857–869.
29. N. J. Carey. *Developing a reliable systematic analysis for arc fault mapping*. Ph. D. Diss. Strathclyde, United Kingdom, University of Strathclyde, 2009.
30. Yu. N. Loginov, S. L. Demakov, M. A. Ivanova, A. G. Illarionov, M. S. Karabanalov, S. I. Stepatov. Effect of annealing on properties of hot-rolled electrical copper. *The Physics of Metals and Metallography*, 2015, vol. 116, no. 4, pp. 393–400. DOI: 10.1134/S0031918X1502009X.
31. S. L. Demakov, Yu. N. Loginov, A. G. Illarionov, M. A. Ivanova, M. S. Karabanalov. Effect of annealing temperature on the texture of copper wire. *The Physics of Metals and Metallography*, 2012, vol. 113, no. 7, pp. 681–686. DOI: 10.1134/S0031918X12070046.

Поступила 06.03.2020, после доработки 27.03.2020;
принята к публикации 05.04.2020

Received March 6, 2020; Received in revised form March 27, 2020;
Accepted April 5, 2020

Информация об авторах

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

Information about the authors

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