

УДК 614.841.2.001.2

DOI: 10.46548/21vek-2022-1157-0020

## ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МЕДНЫЙ ПРОВОДНИК ПО ЕГО МИКРОСТРУКТУРЕ

© 2022

**Мокряк Андрей Юрьевич**, кандидат технических наук, начальник отдела экспертизы пожаров и организации подготовки экспертов Исследовательского центра экспертизы пожаров

**Мокряк Анна Васильевна**, научный сотрудник отдела инновационных и информационных технологий в экспертизе пожаров Исследовательского центра экспертизы пожаров

**Букаткин Алексей Сергеевич**, обучающийся Института безопасности жизнедеятельности  
*Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России*  
(196105, Санкт-Петербург, Московский проспект 149,  
e-mails: mokand7@mail.ru, mokryakanna@mail.ru, bukatkin\_a\_s@mail.ru)

**Аннотация.** Из-за высокого темпа развития электрификации жизни, наиболее частой причиной пожаров становится электрооборудование. Медь широко применяется в электротехнике для изготовления силовых кабелей, проводов или других проводников. Исследование медных проводников после термического воздействия является одной из самых востребованных в экспертных лабораториях и подразделениях МЧС России, поскольку возникновение горения из-за аварийных режимов в электропроводке рассматривается практически на каждом пожаре. В данной статье предложено исследование медных проводников для определения температуры воздействия после пожара методом сканирующей электронной микроскопии. Проведён отжиг медных однопроволочных проводников при температурах от 400 до 1000°C и временах выдержке 15, 30 и 45 мин. Измерена толщина оксидного слоя, возникающего на медном проводнике при различных температурно-временных режимах отжига. Приведены значения толщин оксидного слоя, по которым можно оценить температурное воздействие на медный проводник после пожара. Данные исследования помогут пожарно-техническим экспертам в проведении экспертизы и установлении возможной причины пожара [1-3].

**Ключевые слова:** медь, медные проводники, микроструктура, электрооборудование, оксидная пленка, нагрев, пожар, пожарно-техническая экспертиза, исследование, сканирующая электронная микроскопия.

## ASSESSMENT OF THE TEMPERATURE EFFECT ON A COPPER CONDUCTOR IN THE STUDY OF ITS MICROSTRUCTURE

© 2022

**Mokryak Andrei Yurievich**, candidate of technical sciences,  
head of the department of fire expertise Fire Expertise Research Centre

**Mokryak Anna Vasievna**, researcher of the department of calculative methods and informational technologies  
in the fire expertise Fire Expertise Research Centre

**Bukatkin Aleksei Sergeevich**, the student Institute of Life Safety  
*Fire Service of EMERCOM of Russia*  
(196105, St. Petersburg, Moskovskiy prospect, 149,  
e-mails: mokand7@mail.ru, mokryakanna@mail.ru, bukatkin\_a\_s@mail.ru)

**Abstract.** Due to the high rate of development of electrification of life, the most common cause of fires is electrical equipment. Copper is widely used in electrical engineering for the manufacture of power cables, wires or other conductors. The study of copper conductors after thermal exposure is one of the most popular in expert laboratories and departments of the Ministry of Emergency Situations of Russia, since the occurrence of gorenje due to emergency modes in the wiring is considered at almost every fire. In this article, a study of copper conductors for determining the exposure temperature after a fire by scanning electron microscopy is proposed. Annealing of copper single-wire conductors was carried out at temperatures from 400 to 1000°C and exposure times of 15, 30 and 45 minutes. The thickness of the oxide layer formed on a copper conductor under various temperature-time annealing conditions was measured. The values of the thickness of the oxide layer are given, by which the temperature effect on the copper conductor after a fire can be estimated. These studies will help fire and technical experts in conducting an examination and determining the possible cause of the fire.

**Keywords:** copper, copper conductors, microstructure, electrical equipment, oxide film, heating, fire, fire technical expertise, research, scanning electron microscopy.

**Введение.** Исследование медных проводников при проведении пожарно-технической экспертизы выполняется практически на каждом пожаре. Это обусловлено необходимостью анализа электротехнической версии причины пожара. Как правило, основной целью данного исследования является поиск следов

протекания пожароопасных аварийных режимов работы электрооборудования [1-4]. Основными методами исследования, которые применяет пожарно-технический эксперт при такого рода работах является визуальное исследование, рентгенофазовый анализ и металлографический анализ. Признаки аварийных

режимов, выявляемые теми или иными методами, могут нивелироваться при отжиге медных проводников в ходе пожара. Так, например, нагрев до 900°C медного проводника, оплавленного электрической дугой, вызывает исчезновение признака первичного-вторичного короткого замыкания, выявляемого при исследовании методом рентгенофазового анализа. По этой причине информация о температурном воздействии на медные проводники в ходе пожара относится к числу криминалистически значимых. Известно, что оценка термических поражений медного проводника может выполняться визуальным способом [4]. Однако такой способ дает достаточно грубую оценку температурного воздействия. Также известно о возможности оценки температуры, воздействию которой подвергался медный проводник, путем измерения размера зерна при проведении металлографического анализа [4-6].

**Целью** данной работы было проведение экспериментальных исследований по выявлению более точной возможности оценки температурного воздействия на медный проводник при анализе его микроструктуры методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

**Материалы и результаты исследования.** Известно, что окисление меди протекает по следующим химическим реакциям при температурах 400 и 800°C, соответственно [7-9]:



Визуально окисление в результате внешнего термического воздействия меди можно наблюдать по наличию характерных оксидов чёрного и красного цвета ( $CuO$  и  $Cu_2O$ , соответственно) на поверхности медного проводника [4].

Метод сканирующей электронной микроскопии, среди прочего, даёт возможность исследования среднего химического состава. Это позволяет наблюдать оксидную пленку на поверхности металла, а также измерять её толщину.

Для выявления возможности оценки термического воздействия после пожара на медные проводники были выбраны медные однопроволочные проводники диаметром 1,7 мм, длиной 10 см. Отжиг проводников проводили в муфельной печи «МИМП-10 П» с программным управлением в присутствии продуктов сгорания различных горючих материалов (древесина, резина) с целью имитации условий пожара.

Воздействие внешнего тепла пожара моделировалось следующим образом: в не разогретую муфельную печь помещали образцы медных проводников без изоляции. Условия проведения отжига: температура нагрева 400 – 1000°C с шагом 100°C; скорость нагрева – 15°град/мин; время выдержки при заданных температурах – 15, 30, 45 мин; охлаждение до комнатной температуры – медленное, при открытой дверце в муфельной печи.

Пробоподготовка отожжённых медных проводников – запрессовка, шлифовка и полировка – осуществлялась с помощью металлографического оборудования. Медные проводники после металлографической пробоподготовки подвергались химическому травлению в растворе соляной кислоты и хлорного железа. Исследования полученных образцов проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа *Tescan Vega\XMU* при увеличениях до 2000× [9-13].

Основные результаты проведённых исследований систематизированы на изображениях микроструктур, приведённых на рисунке 1.

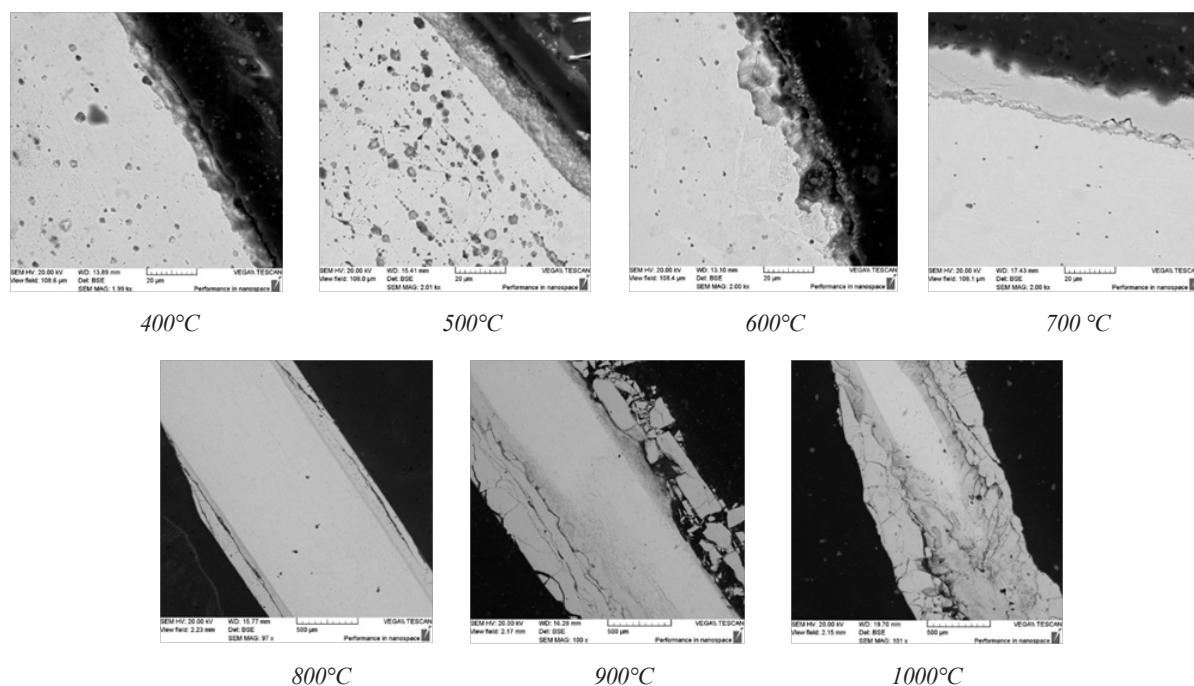


Рисунок 1 – Изменение толщины оксидного слоя на медном проводнике при отжиге до различных температур в течение 30 мин (увеличения приведены на снимках SEM MAG)

Для удобства визуального восприятия и наблюдения оксидной пленки, микроструктуры проводников, отожженных от 400 до 700°C, показаны при увеличениих 2000 крат, а проводники, нагретые свыше этой температуры - при увеличениих 100 крат.

В первую очередь исследования показали то, что основным фактором, влияющим на формирование оксидной пленки на медном проводнике, является температурное воздействие. При этом отжиг при 15, 30 и 45 минутах оказывает незначительное влияние на ее толщину [14-15].

При температурах отжига от 400 до 700°C зафиксировано незначительное увеличение толщины оксидного слоя на поверхности медных проводников.

Однако при данных температурах на толщину оксидной пленки также оказывает некоторое влияние и длительности температурного воздействия. Это обстоятельство не даёт возможности оценки термического влияния на медные проводники после пожара [16-20].

При температуре около 700°C зафиксировано резкое – в 4,5 раза – увеличение оксидного слоя. Дальнейшее возрастание температуры до 1000°C, показало увеличение толщины оксидного слоя еще в 3 раза. Таким образом, по толщине оксидного слоя выше 700°C можно судить об оценочной величине термического воздействия на медный проводник.

Графическая интерпретация изменения толщины оксидного слоя в зависимости от температурно-временного влияния приведена на рисунке 2.

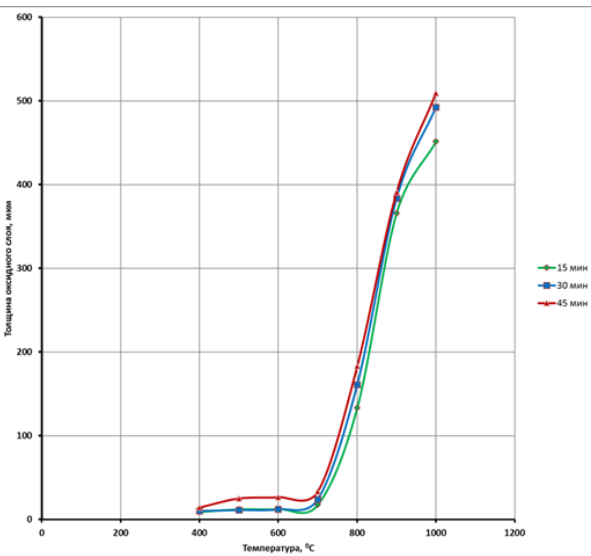


Рисунок 2 – Изменение толщины оксидного слоя при отжиге

Данный график может быть использован при проведении пожарно-технического исследования медных проводников с целью оценки температуры воздействия на него.

Кроме того, для решения задач пожарно-технической экспертизы и экспертного исследования медных проводников при анализе сохранности признаков пожароопасных аварийных режимов работы электрооборудования, можно использовать данные, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Характерные признаки температурного воздействия на медный проводник, выявляемые методом СЭМ

| Микроструктура |  | Температура отжига и ее характерные признаки  |
|----------------|--|---|
|                |  | 400 – 700°C<br>Образование оксида меди CuO, толщина оксидной пленки до 10 мкм                                       |
|                |  | 700 – 900°C<br>Увеличение толщины оксидного слоя и местами его отслаивание, толщина оксидной пленки до 20 - 250 мкм |
|                |  | 900 - 1000°C<br>Интенсивное образование оксидной пленки, толщина оксидной пленки 400 - 500 мкм                      |

**Закключение.** Таким образом по результатам проведённых исследований оксидного слоя медного проводника можно сделать следующие выводы.

До температурного воздействия 700°C наблюдается слабый рост толщины оксидного слоя. Дифференцировать температурное воздействие в зависимости от толщины оксидного слоя до этих температур нецелесообразно, поскольку значения измеряемой величины находятся в пределах погрешности. Однако при температуре отжига выше 700°C происходит резкий рост оксидного слоя. Это даёт возможность оценить температурное воздействие на медный проводник по толщине оксидного слоя. Также эксперименты показали, что такая картина наблюдается при временах отжига 15, 30 и 45 минут, что характеризует температурное воздействие как основной влияющий фактор на образование оксидного слоя. Полученные результаты можно отнести к криминалистически значимой информации и могут быть использованы при проведении пожарно-технических исследований медных проводников.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Смелков Г.И. Пожарная безопасность электропроводок. – М.: ООО «КАБЕЛЬ». – 2009. – 328 с.
2. Колмаков А.И., Граненков Н.М., Зернов С.И., Пеньков В.В., Соколов Н.Г., Степанов Б.В., Таубкин И.С., Чешко И.Д.. Экспертное исследование металлических изделий (по делам о пожарах) / Учебное пособие / М. ЭКЦ МВД России. – 1993. – 104 с.
3. Колмаков А.И., Степанов Б.В., Зернов С.И., Россинская Е.Р., Соколов Н.Г. Диагностика причин разрушения металлических проводников, изъятых с мест пожаров: Методические рекомендации. – М.: ЭКЦ МВД Р. – 1992. – 32 с.
4. Мокряк А.Ю., Чешко И.Д., Парийская А.Ю., Плотноков В.Г., Скодтаев С.В., Мокряк А.В. Экспертное исследование после пожара медных проводников. - Методические указания. – СПб.: Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Санкт-Петербург). – 2019. – 149 с.
5. А.Ю. Мокряк, З.И. Тверьянович, И.Д. Чешко, А.Н. Соколова. Металлографический и морфологический атлас объектов, изымаемых с мест пожаров. – М.: ВНИИПО, 2008. – 184 с.
6. Кончакова И.С., Колмаков А.Г., Гвоздев А.Е. Особенности влияния термического воздействия на структурные изменения в медных проводниках. Материаловедение. – 2020. – № 12. – С. 3-9.
7. Кубашевский О., Гопкинс Б. Окисление металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1965. – 428 с.
8. Александров, А.А. Методические рекомендации по исследованию медных проводников в зоне короткого замыкания и термического воздействия для электропроводок автомобилей Волжского завода [Текст] / А.А. Александров. – М.: ВНИИПО. – 1993. – 35 с.
9. Воронов, С.П. Исследование медных проводников с целью установления признаков очага пожара [Текст] / С.П. Воронов, Н.М. Булочников, Ю.И. Черничук, С.В. Москвич // Сборник научных трудов ВНИИПО. – М.: ВНИИПО. – 2004. – С. 227-228.
10. Erlandsson R., Strand G. An Investigation of Physical Characteristics Indicating Primary or Secondary Electrical Damage // Fire Safety J. – 1984. Vol. 8. – p. 97-103.
11. Ettling B.V. Problems with Surface Analysis of Copper Beads Applied to the Time of Arcing // The Fire Place. – 1997. – Vol. 4. – p. 21-24.
12. Осинцев О.Е. Металловедение и термическая обработка меди и сплавов на ее основе: Учебное пособие [Текст] / О.Е. Осинцев. – М., 1994. – 150 с.
13. Панов, А.Г. Исследование микроструктуры методами автоматического анализа изображения ImageExpert Pro 3 и ImageExpert Sample 2: Методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу "Методы исследования материалов и процессов" [Текст] / А.Г. Панов. - Наб. Челны: ИНЭКА. – 2009. – 63 с.
14. Пантелеев, В.Г. Компьютерная микроскопия [Текст] / В.Г. Пантелеев, О.В. Егорова, Е.И. Клыкова. – М.: Техносфера – 2005. – 304 с.
15. Howitt D.G. The Surface Analysis of Copper Arc Beads - A Critical Review // J. Forensic Science. – 1997. – Vol. 42. – p. 608-609.
16. Howitt D.G. The Chemical Composition of Copper Arc Beads - A Red Herring for the Fire Investigator // Fire and Arson Investigator. – 1998. – Vol. 48. – p. 34-39.
17. Пехотиков, В.А. Определение причастности к пожару электропроводок в стальных оболочках [Текст] / В.А. Пехотиков, В.В. Янишевский, А.В. Богданов, Г.А. Дюбаров // Пожарная профилактика в электроустановках. – М.: ВНИИПО. – 1985. – С. 65-73.
18. Ettling B.V. Electrical Wiring in Building Fires // Fire Technology. – 1978. – Vol. 14, p. 317-325.
19. Gray D.A., Drysdale, D.D., Lewis F.A. Identification of Electrical Sources of Ignition in Fires. // Fire Safety J. – 1983. – Vol. 6. – p. 147-150.
20. Hagemue, W. Die metallographische Untersuchung von Kupferleitern als Method zur Untercheidung zwischen primaren und sekundaren Kurzschlussen // Schriftenreihe der Deutsch Volkspolizei. – 1963. – № 7-12. – p. 1160-1170.

*Статья поступила в редакцию 21.01.2022*

*Статья принята к публикации 10.03.2022*