DOI: https://doi.org/10.33994/kndise.2022.67.42
УДК 343.98

Олена Франківна Федулова
головний судовий експерт

E-mail: fedulovalenaf@gmail.com

Олександр Юрійович Кошель
кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0421-7800
E-mail: okukraine@gmail.com

Український науково-дослідний інститут
спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

Володимир Вікторович Приступа
провідний судовий експерт

E-mail: vprystupa@gmail.com

Київський науково-дослідний інститут судових експертиз
Міністерства юстиції України

ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ БІМЕТАЛЕВИХ ПРОВІДНИКІВ ІЗ ОЗНАКАМИ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

Розглянуто вплив короткого замикання на пошкодження біметалевого провідника. Проведений металографічний аналіз, досліджено хімічний склад фаз металу оплавленої ділянки алюмомідної жили, що утворилася внаслідок проходження через провідник надструму. Виявлено і узагальнено особливості морфологічних і структурних ознак, що формуються в оплавленнях алюмомідного провідника при струмовому перевантаженні і короткому замиканні.

Ключові слова: *металографічний аналіз, коротке замикання, судова пожежно-технічна експертиза, струмове перевантаження, біметалевий провідник, оплавлення, мідь, алюміній.*

Постановка проблеми. Прагнення екологічно спрямованого заміщення паливних механізмів електричними в умовах зростання вартості природного газу логічно призводить до збільшення питомого споживання електроенергії усе більшою кількістю електроприладів високої потужності. Повідомлення інформаційних служб МНС свідчать про зростання

виникнення пожеж, пов'язаних із розвитком аварійних режимів роботи електромереж у вигляді струмових перевантажень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Специфіка розслідування пожеж пов'язана насамперед зі знищенням слідової інформації щодо обставин їх виникнення і розповсюдження. Оскільки такі вироби господарського і спеціального призначення як електропровідники є обов'язковою складовою оснащення будинків, об'єктів і споруд та завжди присутні в електротехнічних пристроях і апаратурі, при розслідуванні пожеж однією з головних стає версія про їх причетність до виникнення горіння аварійних режимів в електрообладнанні і електричній проводці.

Зокрема це обумовлено порівняно високою температурою плавлення металу (для найбільш вживаних алюмінієвих і мідних провідників це, відповідно, близько 660°С і 1100° С, для сталевих – понад 1500° С) [1]. Тобто за температурних умов, за яких вироби з деревини, полімерів та інших розповсюджених легкозаймистих матеріалів знищуються, провідники, як більш термостійки, в значно меншій мірі піддаються руйнівному впливу пожежі.

Приховані струмові перевантаження призводять до пошкодження із середини ізоляційного покриття провідників [2-5], що створює умови режиму короткого замикання, при якому сила струму може перевищувати робочі значення у сотні разів, що, у свою чергу, уможливлює виникнення осередків займання.

При цьому має місце і зворотній причинно-наслідковий зв'язок [2-5], коли в умовах зовнішнього термічного впливу пожежі порушується цілісність ізоляції провідників, результатом чого стає утворення оплавлень короткого замикання (далі – КЗ). І хоч останнє на даний час є досить дослідженим із експертно-криміналістичної точки зору пожежонебезпечним режимом, у профільній методичній літературі відсутні відомості щодо структурних особливостей і хімічного складу металу оплавлень КЗ на біметалевих алюмомідних провідниках.

Мета дослідження. Визначити особливості судово-експертного дослідження біметалевих провідників із ознаками короткого замикання і розкрити обумовленні останнім явищем структурні особливості та хімічний склад металу оплавлень на алюмомідних провідниках такого типу.

Викладення основного матеріалу. Встановлення прямого або зворотного причинно-наслідкового зв'язку між пожежею та коротким замиканням на електричних провідниках можливе завдяки тому, що метал провідників здатний зберігати ситуаційну слідову інформацію в мікроструктурі, яка фіксує параметри стану металу як в процесі його затвердіння, так і після цього, разом із змінами фізико-хімічних (у першу чергу температурних) умов навколишнього середовища. До того ж, уявлення експерта, який досліджує короткі замикання на провідниках, про початковий стан і специфічні характеристики загалом стандартизованого металу цих провідників у значній мірі сприяють ідентифікації зазначених вище ознак і слідів.

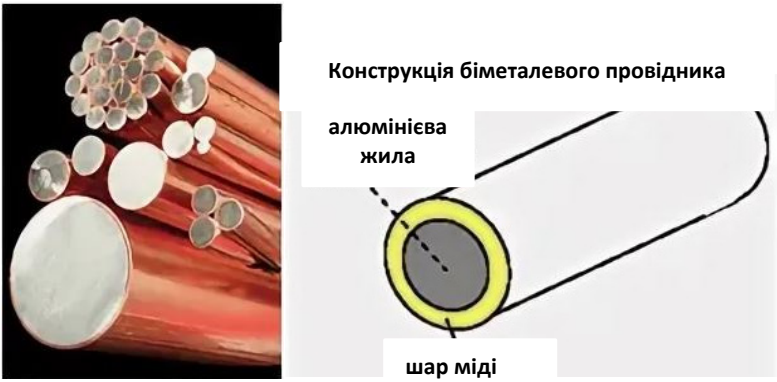
На даний час основними матеріалами для виробництва кабельної продукції є мідь і алюміній. З цим пов'язано наповненість існуючих методичних

посібників розробками інструментальних методів встановлення відносного моменту виникнення коротких замикань – так званих «первинних» КЗ (таких, що виникли до пожежі і могли ініціювати її) і «вторинних» КЗ (таких, що утворилися в умовах пожежі) – виключно для мідних і алюмінієвих провідників [6-9].

Біметалеві провідники несправедливо залишились поза увагою профільної методичної літератури. Про те, що зазначений факт є упущенням, свідчать непоодинокі випадки надходження фрагментів алюмінієво-мідної проводки із ознаками оплавлення в якості об'єктів експертного дослідження під час розслідування причин виникнення пожеж.

Слід зазначити, що поєднання міді і алюмінію у біметалевому дроті дозволяє отримати продукт, що поєднує переваги цих двох металів, а отже робить його привабливим для використання у побуті і промисловості. Відповідно до [10], біметалеві провідники поєднують у собі електропровідність міді з легкою вагою алюмінію. Переваги забезпечують економію ваги, підвищену гнучкість, зниження корозії і, як наслідок, збільшення терміну експлуатації кабельно-провідникової продукції.

Конструктивно алюмомідний провідник являє собою центральну жилу з алюмінію, зовні плаковану міддю шляхом спільного гарячого волочіння основного металу (алюмінію) і покриття (міді) [10, 11], де мідна складова займає до 20 % поперечного перерізу провідника (рис. 1) [12].



а б

Рис. 1. Зрізи біметалевих алюмомідних кабелів різних діаметрів (а), схематичне зображення зрізу такого кабелю (б)

Загалом біметалевий провідниковий матеріал – це багатошаровий провідниковий матеріал, що складається з двох шарів металів, поверхні яких знаходяться у стані молекулярно-атомного зчеплення [13]. Технологія отримання біметалевого проводу міститься у термомеханічному з'єднанні алюмінієвої жили і мідної оболонки, виготовленої з плаского стрічки

розрахованих розмірів. Обгорнуту мідною стрічкою алюмінієву жилу нагрівають і протягують через калібровані з певним шагом вальки, в результаті чого утворюється композиційний матеріал з міді та алюмінію, що володіє властивостями обох металів. У подальшому його можна обробляти методом волочіння для отримання проводів меншого діаметру, при цьому співвідношення металів у провіднику зберігається.

Слід зазначити, що різниця вихідних фізичних характеристик міді і алюмінію, поєднаних у біметалевому провіднику, з експертної точки зору, може створити умови для помилкової оцінки оплавлення КЗ алюмомідної жили на стадії її морфологічного дослідження. Оскільки температура плавлення міді вища за температуру плавлення алюмінію, розплавлення масиву металу алюмінієвого сердечника може не спричинити суттєвого пошкодження мідної оболонки на прилеглій до оплавлення ділянці біметалевого провідника. Зовні зона оплавлення алюмомідного провідника звичайно являє собою оплавлену ділянку світло-сірого кольору (алюмінієво-мідного сплаву) на жовтому (мідному) провіднику (рис. 2).

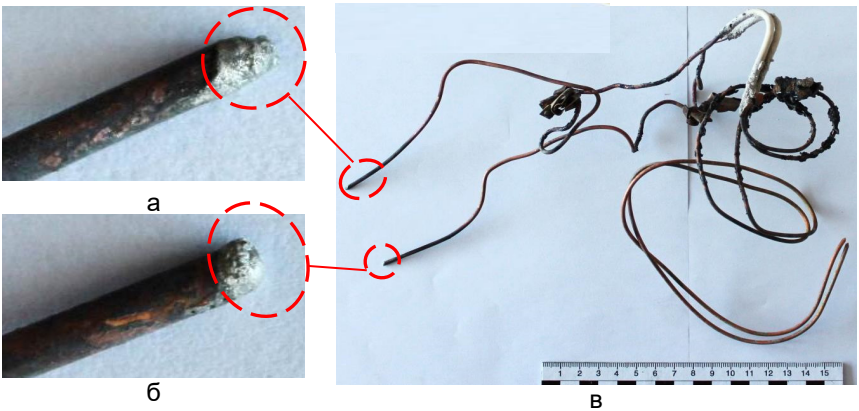


Рис. 2. Оплавлення короткого замикання на біметалевих провідниках
а – збільшене зображення оплавлення КЗ провідника № 1, б – збільшене зображення оплавлення КЗ провідника № 2, в – загальний вигляд вилучених біметалевих провідників

Завдяки зазначеним морфологічним особливостям локалізоване оплавлення (у тому числі оплавлення КЗ) біметалевого провідника можна помилково прийняти за наплавлення стороннього металу на поверхні монометалевого мідного провідника.

Така помилка набагато менш очікувана у випадку поєднання у біметалевому провіднику сталі і міді. Оплавлення сталево-мідного провідника на прилеглих до нього ділянках буде розігрівати сталевий сердечник до температур, вищих температури плавлення міді, провокуючи пошкодження

мідної оболонки, що дасть можливість візуально визначити багатошаровий характер досліджуваного дроту.

Наведений з експертної практики приклад дослідження біметалевих (алюмомідних) провідників з ознаками короткого замикання, вилучених з місця пожежі (у даному випадку пожежа відбувалась у житловому будинку), вказує, що ці вилучені провідники, окрім світло-сірого забарвлення оплавлених кінців, загалом мають вигляд мідних провідників (рис. 2).

Локальний характер, округла форма оплавлень № 1 і № 2, наявність на них кратероподібних заглиблень свідчать про те, що дані оплавлення утворились внаслідок короткого замикання. З метою встановлення умов навколишнього середовища (холодне чи розжарене), в якому відбувалось замикання, досліджувалась мікроструктура оплавлень КЗ при різних збільшеннях.

На рис. 3 представлено мікроструктуру оплавлень КЗ алюмомідних провідників № 1 і № 2 (дослідження проводилось при збільшеннях 50х).

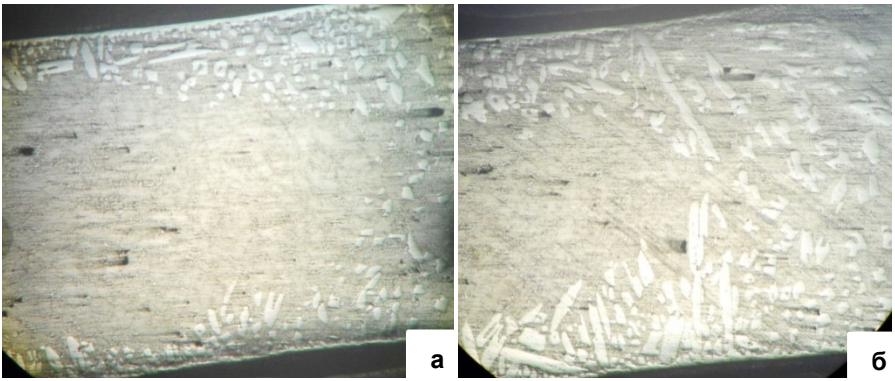


Рис. 3. Мікроструктура оплавлень КЗ алюмомідних провідників (х50)
а – провідник № 1, б – провідник № 2

Структура оплавлень КЗ досліджуваних провідників загалом складається з витягнутих переважно у бік їх поверхні світлих зерен металу кристалічного каркасу, первісно утвореного у ході затвердіння металу, а також оточуючої ці зерна багатофазної евтектики. Зазначена орієнтація первісних зерен найбільш ймовірно пов’язана із залишковим збереженням на досліджуваній ділянці провідника мідної оболонки, яка й створювала умови для направленої кристалізації оплавлення.

Дослідження мікроструктури металу оплавлень КЗ, а також встановлення хімічного складу первісних зерен та складових евтектичних утворень проводилося на скануючому електронному мікроскопі TESCAN Vega 3 із енергодисперсійним рентгенівським детектором OXFORDX-Max^{N} 20, за таких умов:

– збільшення:	100÷10000×;
– прискорююча напруга:	10 кВ;
– діапазон аналізу елементів:	від $_4$Be до$_{92}$U;
– час експозиції для кожного спектра:	100 с.
– детектування	BSE
– час експозиції для кожного спектра:	100 с.

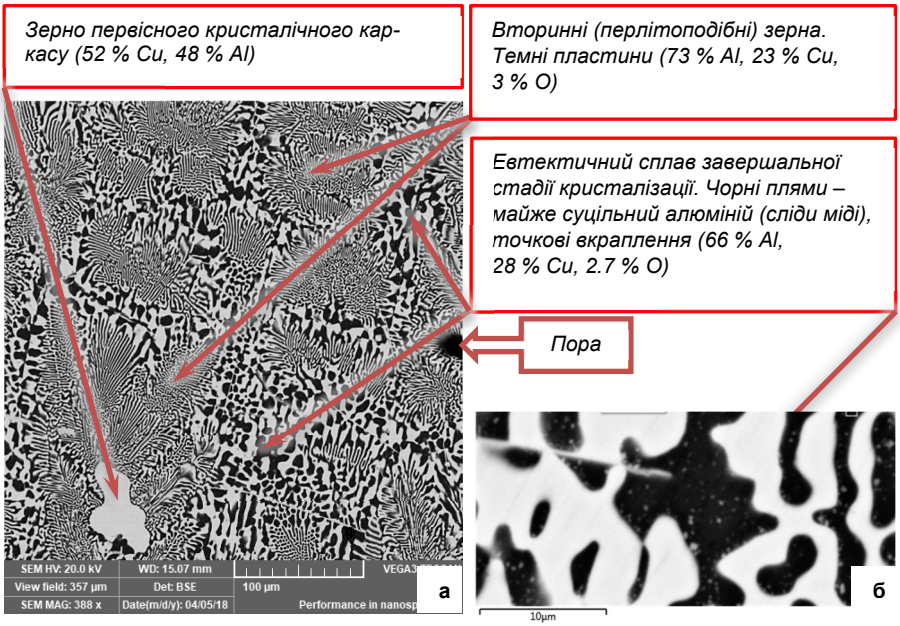


Рис. 4. Мікроструктура оплавлення КЗ алюмомідного провідника
а – збільшення 400^x, б – збільшення 3000^x.

У випадку біметалевих провідників, таких, як дріт з алюмінію, плакований міддю, аналіз структури оплавлення виконується в режимі детектування пружно відбитих електронів (BSE), що створює фазовий контраст залежно від масового номера елементів, які формують місце оплавлення.

Відповідно до геометричних особливостей та розподілу сформованих зерен і змішаних фаз спершу формувався кристалічний каркас з мідно-алюмінієвого сплаву зі складом 52 % Cu і 48 % Al (рис. 4а). На макроструктурі (рис. 3) він представлений скупченням на границях провідника переважно витягнутих зерен білого кольору, а також розподіленими в металі

серцевини оплавлення поодинокими дендритами невизначеної конфігурації.

У другу чергу навколо сформованих первісних зерен, як осередків кристалізації, а також виокремлено від них, формувалися угрупування двофазних евтектоїдних (перлітоподібних) зерен. Евтектична двофазна структура останніх складається з тонких пластин темного кольору алюмоміднокисневого сплаву (73 % Al, 23 % Cu, 3 % O) на світлому фоні мідноалюмінієвого (52 % Cu, 48 % Al) сплаву (рис. 4а). Ці зерна укрупнені, мають переважно рівноосну форму. Останнє свідчить про те, що вторинні зерна формувалися більш тривалий час і в умовах більш високих, у порівнянні з первісними зернами (дендритами), температур навколишнього середовища.

Завершальною стадією кристалізації оплавлення КЗ досліджуваного біметалевого алюмомідного провідника стало формування на границях перлітоподібних зерен з пластинчастими дрібнодисперсними фазами пограничної евтектики (рис. 4а), що має найнижчу температуру кристалізації і складається зі світлої мідно-алюмінієвої фази (52 % Cu, 48 % Al,), темної алюмомідної фази (майже суцільний Al, сліди міді) та світлих вкраплень в останній зі складом 66 % Al, 28 % Cu, 2.7 % O (рис. 4б).

Результати проведеного металографічного аналізу свідчать про те, що при дослідженні мікроструктури оплавлення КЗ будь-якого біметалевого (триметалевого) провідника про стан (холодний чи розжарений) зовнішнього середовища, у якому відбувалось оплавлення, слід робити висновки саме за геометрією первісно утворених зерен (перерізу кристалічного каркасу). Тобто, як і при дослідженні монометалевих (мідних і алюмінієвих) провідників, оцінці підлягають найбільш тугоплавкі складові кристалічної спільноти затверділого металу оплавлення КЗ, які формуються в умовах мінімальних температурних видозмін неоплавленої ділянки провідника та інших контактуючих з провідником середовищ.

Зокрема, для наведеного в статті у якості прикладу біметалевого провідника дрібнодисперсність первісних зерен мідноалюмінієвого сплаву (52 % Cu, 48 % Al), їх виражено витягнута у бік поверхні провідника форма свідчить про прискорене направлене затвердіння в умовах достатньо високого градієнту температур між розплавленою краплею і провідником, а отже про те, що оплавлення КЗ на досліджуваному провіднику було утворено у нерозжареному середовищі і загалом відповідає первинному короткому замиканню.

Автори зосередили увагу на морфологічних особливостях локалізованих оплавлень алюмомідних провідників з метою уникнення хибного сприйняття оплавлень КЗ алюмомідних провідників як наплавлень стороннього металу на монометалевих мідних провідниках.

Висновки. Наведені у статті дані можуть бути використані в ході проведення експертиз у справах про пожежі і електротехнічних експертизах, зокрема при дослідженні морфології і описі структур металу оплавлень короткого замикання біметалевих провідників. При цьому автори звертають увагу на те, що в даній статті розглянуто лише окремий випадок

оплавлення КЗ біметалевого провідника, вилученого з місця пожежі, де на структуру оплавленої КЗ ділянки, а також на хімічний склад її фаз впливали конкретні зовнішні електричні і температурні чинники. В інших випадках ситуація може дещо змінюватися залежно від напруги в системі живлення, характеру дуги, температури навколишнього середовища, геометрії провідника тощо. Отже, наукові дослідження у даному напрямку, в першу чергу із моделюванням коротких замикань, проведенням фазового аналізу металу оплавлень, доцільно продовжувати.

Перелік посилань

1. Болховитинов Н. Ф. Металловедение и термическая обработка. Москва, 1961. 462 с.

2. Смелков Г. И. Пожарная опасность электропроводок при аварийных режимах. Москва: Энергоатомиздат, 1984. 184 с.

3. Смелков Г. И., Александров А. А., Пехотиков В. А. Методы определения причастности к пожарам аварийных режимов в электротехнических устройствах. Москва, 1980. 58 с.

4. Чешко И. Д. Экспертиза пожаров (объекты, методы, методики исследования) / СПб ИПБ МВД России. Санкт-Петербург, 1997. 560 с.

5. Чешко И. Д. Технические основы расследования пожаров: метод. пособ. / ВНИИПО. Москва, 2001. 254 с.

6. Мокряк А. Ю., Чешко И. Д. Металлографический анализ медных проводников, подвергшихся воздействию токовой перегрузки при экспертизе пожаров. *Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России*. 2014. № 4. С. 51-58.

7. Митричев Л. С., Колмаков А. И., Степанов Б. В., Россинская Е. Р., Вртанесьян Э. В., Зернов С. И. Исследование медных и алюминиевых проводников в зонах короткого замыкания и термического воздействия: метод. рек. / ВНИИ МВД СССР. Москва. 1986. 44 с.

8. Розробка методичних рекомендацій дослідження слідів коротких замикань з

References

1. Bolkhovitinov, N. F. (1961). Metal Science and Thermal Processing. Moscow. 462 p. (in Russian).

2. Smelkov, G. I. (1984). Fire danger of electrical wiring under emergency conditions. Moscow. 184 p. (in Russian).

3. Smelkov, G. I., Aleksandrov, A. A., Pekhotikov, V. A. (1980). Methods for determining the involvement of emergency modes in electrical devices in fires. Moscow. 58 p. (in Russian).

4. Cheshko, I. D. (1997). Examination of fires (objects, methods, research methods). St. Petersburg. 560 p. (in Russian).

5. Cheshko, I. D. (2001). Technical foundations of fire investigation: method. allowance Moscow. 254 p. (in Russian).

6. Mokriak, A. Yu., Cheshko, I. D. (2014). Metallographic analysis of copper conductors exposed to current overload during fire examination. *Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. No. 4. P. 51-58. (in Russian).

7. Mitrichev, L. S., Kolmakov, A. I., Stepanov, B. V., Rossinskaia, E. R., Vrtanesian, E. V., Zernov, S. I. (1986). Study of copper and aluminum conductors in short circuit and thermal impact zones: method. rec. Moscow. 44 p. (in Russian).

8. Development of guidelines for the study of traces of short circuits in order to establish

метою встановлення їх причетності до пожежі: звіт про НДР 11. 5. 7.-98. Київ, 2002.

9. Буханченко О. А., Гуралюк І. В., Запорожець Є. В. Методика дослідження електричних провідників з ознаками короткого замикання / ДНДЕКЦ МВС України. Київ. 2014. 111 с.

10. Биметаллические проводники для проводов и кабелей. URL: https://www.aluminas.ru/ (дата звернення: 17.09.2021).

11. Хаяк Г. С. Волочение проволоки из цветных металлов и сплавов. Москва, 1967. 151 с.

12. Биметаллический провод. URL: kabels.ru/blog/int/Кабельные системы/ (дата звернення: 17.09.2021).

13. ГОСТ 22265-76. Материалы проводниковые. Термины и определения. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200011378.

14. Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis 4th Edition, J. Goldstein, DaleE. Newbury, JosephR. Michael, Nicholas W.M. Ritchie, J. Henry J. Scott, D. C. Joy, Springer, 2018, 550 p.

15. ДСТУ Б А.1.1-9-94. Метод електронної мікроскопії матеріалів. Терміни та визначення.

16. Перекрестов В. І. Практичні методи електронної мікроскопії: навч. посіб. / Сумський держ. ун-т. Суми, 2014. 241 с.

17. Зайцев Д. М., Приступа В. В. Можливості та перспективи застосування електронної мікроскопії з рентгенофлуоресцентним енергодисперсійним мікроаналізом в судовій експертизі. *Криміналістика і судова експертиза:* міжвід. наук.-метод. зб. / КНДІСЕ. 2018. Вип. 63, ч. 1. С. 357-369.

their involvement in the fire: research report 11. 5. 7.-98. Kyiv, 2002. (in Ukrainian).

9. Bukhanchenko, O. A., Huraliuk, I. V., Zaporozhets, Ye. V. (2014). Methods of research of electrical conductors with signs of short circuit. Kyiv. 111 p. (in Ukrainian).

10. Bimetallic conductors for wires and cables. Retrieved from: https://www.aluminas.ru/. (in Russian).

11. Khaiak, G. S. (1967). Wire drawing from non-ferrous metals and alloys. Moscow. 151 p.

12. Bimetallic wire. Retrieved from: kabels.ru/blog/int/Cable systems/. (in Russian).

13. GOST 22265-76. Conductive materials. Terms and Definitions. Retrieved from: https://docs.cntd.ru/document/1200011378. (in Russian).

14. Goldstein, J., Newbury, DaleE, Michael, JosephR., Nicholas, W. M., Ritchie, J., Henry J. Scott, Joy, D. C. (2018). Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis 4th Edition. Springer. 550 p. (in English).

15. DSTU Б А.1.1-9-94. Method of electron microscopy of materials. Terms and definitions. (in Ukrainian).

16. Perekrestov, V. I. (2014). Practical methods of electron microscopy: textbook. Sumy. 241 p. (in Ukrainian).

17. Zaitsev, D. M., Prystupa, V. V. (2018). Possibilities and prospects of electron microscopy with X-ray fluorescence energy dispersive microanalysis in forensic examination. *Criminalistics and Forensics:* interdepartmental scientific methodological collection. Issue 63. Part 1. P. 357-369. (in Ukrainian).

FEATURES OF THE STUDY OF BIMETALLIC CONDUCTORS WITH SIGNS OF A SHORT CIRCUIT

O. Fedulova
O. Koshel
V. Prystupa

In the process of investigating fires, the version of involvement in the occurrence of burning emergency modes in electrical equipment and electrical wiring often becomes one of the main ones. The consequence of the current overload of electrical conductors is the appearance of localized short circuit melting on them.

In the indicated context, the most important stage of the study is the establishment of a direct or reverse causal relationship between a fire and a short circuit. The latter is possible due to the fact that the conductor metal is able to store situational trace information in the microstructure, which fixes the parameters of the state of the metal both during its solidification and after that, together with changes in the physicochemical (primarily temperature) environmental conditions.

The main materials for the production of the most common cable products at the moment are copper and aluminium, which is the reason for the fullness of the existing methodological manuals with the development of instrumental methods for establishing the moment of occurrence of short circuits relative to fire exclusively for copper and aluminium conductors.

Bimetallic conductors undeservedly remained outside the field of view of specialized methodological literature. The fact that this fact is an omission is evidenced by repeated cases of receipt of melted fragments of aluminium-copper wiring as objects of expert research in investigations into the causes of fires.

The article pays special attention to the design of bimetallic conductors and the related features of the morphology of the melted areas to avoid erroneous interpretation of the melting of a short circuit of an aluminium-copper, as the deposition of foreign metal on a monometallic copper conductor.

Also, the purpose of this work was to provide specialists who are to investigate short circuits on bimetallic aluminium-copper conductors, including with a metallographic analysis, information missing in the specialised methodological literature regarding the structural features and chemical composition of the short circuit melting metal on conductors of this type.

An example from the expert practice of studying bimetallic (aluminium-copper) conductors with signs of a short circuit is given.

The data presented in the article are based on studies using optical and scanning electron microscopy.

Key words: metallographic analysis, short circuit, forensic fire expert, overcurrent, melting, bimetal, wiring.