

УДК 614.8

МІКРОСТРУКТУРА ПРОВОДІВ ВНУТРІШНІХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ, ЯКІ ПОБУВАЛИ В УМОВАХ ПОЖЕЖІ

Василь Гудим¹, д. т. н., Олег Кузін², к. т. н., Олег Назаровець³, к. т. н.

¹Львівський національний аграрний університет,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: gudymvi@ukr.net

²Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна,
e-mail: n_kuzin@mail.ru

³Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
вул. Клепарівська, 35, м. Львів, Україна,
e-mail: nazarovets.oleg@gmail.com

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2018.01.129>

Постановка проблеми. В Україні, як і в більшості країн світу, упродовж останніх десяти років відбувся значний прорив у будівництві сучасного житла та офісних приміщень з високим рівнем комфорту за рахунок використання побутової та офісної автоматизованої електроапаратури. За минулий рік в експлуатацію введено близько 20 тис. житлових будинків, або понад 4 млн м² житла. Однак в експлуатації ще залишається близько 15 % будівель старої забудови, в яких внутрішні електричні мережі виконані з алюмінієвих проводів, які, як підтверджує статистика, є причиною виникнення пожеж. Це пояснюється тим, що, на відміну від сучасних технічних та будівельних норм, колись допускалося використання алюмінієвих проводів, які мають набагато гірші електричні характеристики, ніж мідні. У зв'язку з цим в Україні набрали чинності вимоги до побудови внутрішніх електромереж житлових будівель, які забороняють використання з цією метою алюмінієвих проводів, а тому тепер для побудови внутрішніх електричних мереж використовують винятково мідні провали [1 – 4; 10].

Проаналізувавши статистику причин виникнення пожеж, які відбулися впродовж останніх років, можна зробити висновок, що електропроводи є одним із найпоширеніших джерел загорянь, оскільки приблизно 61 % усіх пожеж, пов'язаних з електроустановками промислового та побутового призначення, виникає від кабельно-провідникових виробів [4; 8; 11; 15]. Таким чином, питання пожежної безпеки в електроустановках, а також пошук методів виявлення причин пожеж є важливим та актуальним і потребує вирішення. Однак закономірне зростання кількості й по-

тужності споживачів електроенергії призводить до перевантаження електричних мереж, що зумовлює швидке старіння ізоляції, її руйнування і, відповідно, скорочення терміну експлуатації проводів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз обліку пожеж в Україні показує, що причинами їх виникнення у 20...25 % випадків є порушення правил монтажу та експлуатації електроустановок [5; 8 – 17]. Це свідчить про те, що кожна п'ята пожежа виникає внаслідок нагрівання електричних проводів струмами перевантажень та коротких замикань в електроустановках та внутрішніх електромережах будівель різного призначення. Враховуючи те, що алюміній має низьку температуру плавлення (650...670 °С), досить часто під час встановлення причин виникнення пожежі ці оплавленні помилково вважаються оплавленнями від короткого замикання (КЗ) [6; 7]. Слід зауважити, що оплавленні проводів можуть бути викликані не лише струмами перевантаження та КЗ, а й іншими високотемпературними джерелами тепла, наприклад полум'ям пожеж.

Постановка завдання.

Під час здійснення пожежно-технічної експертизи практично за кожним фактом виявлення проплавлених металевих оболонки та оплавлених електричних проводів внутрішніх і зовнішніх електромереж висуваються версії про їх причетність до виникнення пожеж, що не завжди відповідає дійсності. Тому поставлено завдання за допомогою сучасних фізико-хімічних методів виконати аналіз мікроструктур алюмінієвих та мідних проводів, які

побували в умовах пожеж, з метою узагальнення результатів та обґрунтування критеріїв, які б лягли в основу вдосконалення пожежно-технічної експертизи пожеж [1 – 3; 12; 16 – 20].

Виклад основного матеріалу. Відомо, що алюміній відрізняється від інших металів малою густиною, високими пластичними і корозійностійкими властивостями, великою тепло- та електропровідністю, а також відбивною здатністю. Залежно від вмісту домішок алюміній поділяється на: технічний, високої чистоти і особливої чистоти. Для електротехнічних цілей використовують алюміній, що містить не більше ніж 0,5 % домішок, марка АІ. Питома провідність алюмінію значно залежить від виду та кількості домішок. Домішки Ni, Si, Zn або Fe за їх вмісту 0,5 % знижують у відпаленого алюмінію питому провідність майже на 2-3 %. Мідь є кристалічним матеріалом, тобто характеризується тривимірною періодичністю в розташуванні атомів. При цьому конкретне розташування атомів і відстані між ними різні для різних металів. Сукупність атомів утворює кристалічну ґратку. Характеристикою кристалічної структури є елементарна комірка – паралелепіпед мінімальних розмірів, у вершинах якого та всередині граней розташовані атоми, і паралельним перенесенням паралелепіпеда можна цілком заповнити простір [6; 7].

Практично всі фізико-хімічні методи ґрунтуються на аналізі структурних перетворень, які відбуваються під впливом високих температур та безпосереднього впливу полум'я пожежі, що дозволяє використати їх для дослідження алюмінієвих та мідних проводів під час встановлення причини виникнення пожежі.

У процесі здійснення пожежно-технічних експертиз найчастіше проводять внутрішніх електричних мереж зі слідами оплавлення досліджують методом металографічного аналізу, а рентгеноструктурний та кулонометричний методи використовують для виявлення вмісту вуглецю в алюмінієвих проводах.

Під час дослідження провідників для створення температурних режимів використано муфельну піч МП-2УМ потужністю 2,6 кВт з межами зміни температури від 0 до 1000 °С. Струмове навантаження провідників створювалося зварювальним трансформатором номінальною потужністю $P = 5$ кВт зі струмом первинної обмотки $I_1 = 23$ А та напругою первинної обмотки $U_1 = 220$ В. Використовуваний зварювальний трансформатор забезпечує напругу

вторинної обмотки $U_2 = 50$ В та найбільше діюче значення струму $I_{2 \max} = 110$ А. Таким чином, досліджуваний провідник приєднувався до виводів вторинної обмотки зварювального трансформатора, при цьому струм збільшувався плавно або раптово залежно від умов експерименту.

Після ліквідації КЗ провідники вилучали з температурного середовища й охолоджували до кімнатної температури для подальших досліджень. Контроль температури здійснювали температурним перетворювачем ХА «хромель-алюмель», з'єднаним із вторинним приладом і регулятором температури РТ-0102 на симісторі.

Суть експериментального дослідження полягала у визначенні зміни мікроструктури провідників, в яких відбулося КЗ, з подальшим нагріванням середовища і жил провідників іншим джерелом тепла до температури плавлення. З цією метою в муфельну піч поміщали алюмінієві провідники із полівінілхлоридною (ПВХ) ізоляцією, площею поперечного перерізу 2,5 і 4 мм² і довжиною 20 см.

Досліди проводили за такою послідовністю (табл. 1).

Після закінчення експериментів вилучали відрізки провідників з оплавленнями розміром 50...100 мм, з яких потім виготовляли шліфи. Процес виготовлення шліфів полягав у тому, що ділянку провідника з оплавлення розміром 7...12 мм розміщували в металевій оправці і заливали легкоплавким і швидкозатверднучим сплавом Вуда (рис. 1).

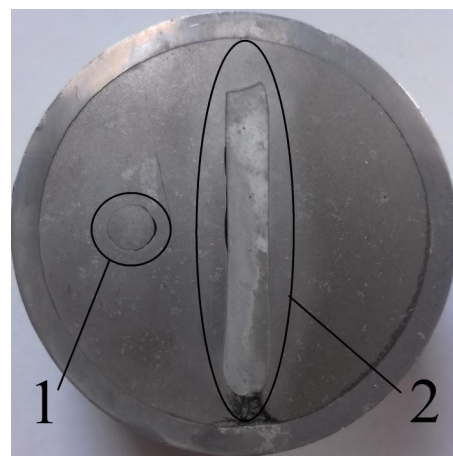


Рис. 1. Зовнішній вигляд шліфа алюмінієвого проводу:
1 – поперечний переріз, 2 – поздовжній переріз
Fig. 1. Appearance of the aluminum wire slot:
1 – cross section, 2 – longitudinal section

Таблиця 1. Умови проведення експериментів з алюмінієвими проводами

Table 1. Conditions for experiments with aluminum wires

№ з/п	Температура середовища T , °C	Характеристика умов виконання експериментів
1	150	Час перебування провідника в муфельній печі 7 хв. Умови: поступове охолодження повітрям ($T = 20$ °C)
2	250	Час перебування провідника в муфельній печі 12 хв. Умови: поступове охолодження повітрям ($T = 20$ °C)
3	350	Час перебування провідника в муфельній печі 17 хв. Умови: поступове охолодження повітрям ($T = 20$ °C)
4	450	Час перебування провідника в муфельній печі 27 хв. Умови: поступове охолодження повітрям ($T = 20$ °C)
5	550	Час перебування провідника в муфельній печі 38 хв. Умови: поступове охолодження повітрям ($T = 20$ °C)
6	650	Час перебування провідника в муфельній печі 51 хв. Умови: поступове охолодження повітрям ($T = 20$ °C)
7	20	КЗ провідника відбулося за температури 20 °C. Умови: поступове охолодження повітрям ($T = 20$ °C)
8	250	Після КЗ провідник нагрівався в муфельній печі до температури 250 °C і поступово охолоджувався повітрям ($T = 20$ °C)
9	450	Після КЗ провідник нагрівався в муфельній печі до температури 450 °C і поступово охолоджувався повітрям ($T = 20$ °C)
10	650	Після КЗ провідник нагрівався в муфельній печі до температури 650 °C і поступово охолоджувався повітрям ($T = 20$ °C)

Після застигання сплаву Вуда зразки шліфували на обертовому колі з абразивним папером різної зернистості. Змінюючи зернистість абразивного паперу змінювали й напрям шліфування на 90°. Шліфування проводили до повного зникнення ризик від попередньої операції. Шорсткість поверхні після шліфування не перевищувала 0,08 мкм.

Аналогічні дослідження виконано стосовно мідних проводів із ПВХ-ізоляцією та площею поперечного перерізу 1,5 і 2,5 мм².

Відомо, що під час пожежно-технічної експертизи важливим аргументом для обґрунтування причини виникнення пожеж є оплавлення та вміст кисню в оплавлених зразках електричних проводів, кількість якого може бути різною [10; 16; 18].

З метою встановлення залежностей зміни вмісту кисню у структурі мідних провідників, які після розмикання контуру зі струмом КЗ нагрівалися полум'ям до різних температур, було відібрано 10 зразків провідників.

Температурні режими створювали за допомогою модельного вогнища класу А з межами зміни температури від 20 до 800 °C. Дослідження виконували в послідовності, яка наведена в табл. 2.

Таблиця 2. Умови проведення експериментів з мідними проводами

Table 2. Experiment conditions with copper wires

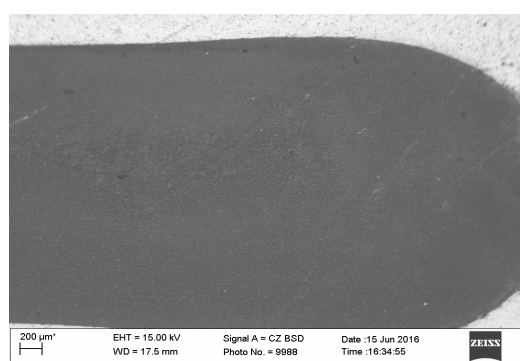
№ з/п	Температура середовища, °C	Характеристика умов виконання експериментів
1	20	КЗ відбулося за температури 20 °C. Провідники поступово охолоджувалися на повітрі ($T = 20$ °C)
2	400	Провідники перебували в модельному вогнищі 10 хв та після вилучення поступово охолоджувалися на повітрі ($T = 20$ °C)
3	600	Провідники перебували в модельному вогнищі 15 хв та після вилучення поступово охолоджувалися на повітрі ($T = 20$ °C)
4	800	Провідники перебували в модельному вогнищі 20 хв та після вилучення поступово охолоджувалися на повітрі ($T = 20$ °C)
5	750 ... 800	Провідники перебували в модельному вогнищі 30 хв та після вилучення поступово охолоджувалися на повітрі ($T = 20$ °C)

Зміну хімічного складу провідників під час КЗ досліджували методом локального рентгено-спектрального аналізу.

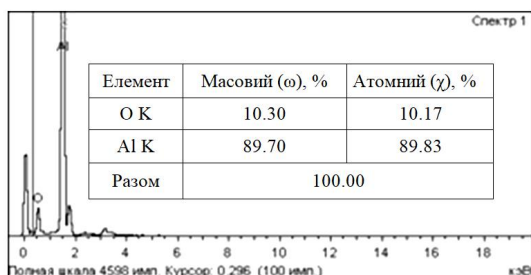
Зміну хімічного складу провідників у зоні утворення оплавлень (на поверхні провідника) та основного металу досліджували методом локального рентгеноспектрального аналізу з використанням скануючого електронного мікроскопа ZEISS EVO 40XVP, оснащеного системою рентгенівського мікроаналізу INCA Energy [6].

Для встановлення залежності зміни хімічного складу у структурі алюмінієвих провідників було відібрано такі зразки: еталон; провідник що був нагрітий струмом КЗ; провідники, які нагрівалися у муфельній печі до температур 250, 450 та 650 °С; а також провідники, які попередньо нагрівалися струмами КЗ, а далі – у муфельній печі до температур 250, 450 та 650 °С.

На рис. 2 показано структуру шліфа ділянки алюмінієвого провідника еталонного зразка, для якої встановлено, що масовий вміст кисню $\omega(\text{O})$ складає 10,3 %, а алюмінію $\omega(\text{Al}) = 89,7$ %.



а

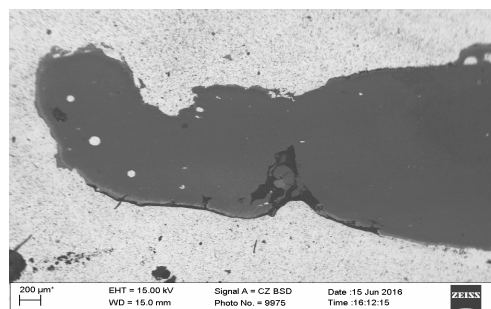


б

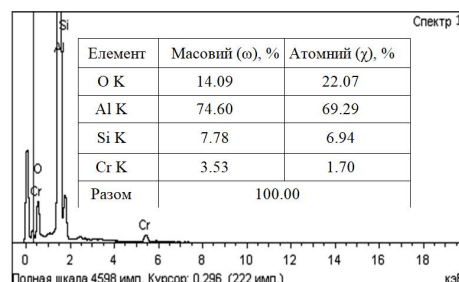
Рис. 2. Ділянка еталонного зразка провідника (а) та вміст елементів (б) у цьому зразку
Fig. 2. The conductor's piece of the reference sample (a) and the content of the elements (б) in this reference sample

Проаналізувавши ділянку алюмінієвого провідника, який був нагрітий струмом КЗ з подальшим охолодженням на повітрі, встановили, що в структурі присутні елементи, масовий вміст яких становить: кисню $\omega(\text{O}) = 14,09$ %, алюмінію $\omega(\text{Al}) = 74,60$ %, силіцію $\omega(\text{Si}) = 7,78$ % та хрому $\omega(\text{Cr}) = 3,53$ % (рис. 3).

Аналіз зразка, який був нагрітий у муфельній печі до температури 250 °С з подальшим охолодженням на повітрі (рис. 4), показав, що вміст кисню $\omega(\text{O})$ становить 38,87 %, алюмінію $\omega(\text{Al}) = 42,92$ %, вуглецю $\omega(\text{C}) = 12,81$ %, силіцію $\omega(\text{Si}) = 2,59$ % та хрому $\omega(\text{Cr}) = 2,81$ %.

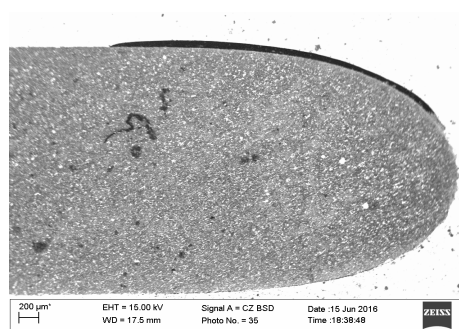


а

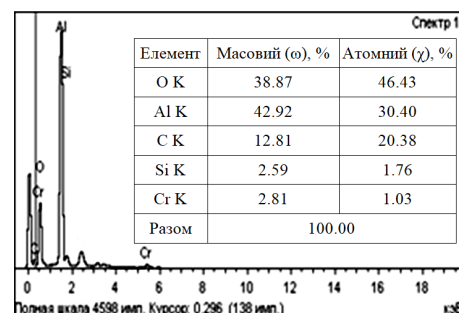


б

Рис. 3. Ділянка провідника (а), у якому відбулось КЗ з подальшим охолодженням на повітрі, та вміст елементів (б) у цьому провіднику
Fig. 3. The conductor's piece (a), in which there was a short-circuit (SC) with subsequent cooling on the air, and the contents of the elements (б) in this conductor



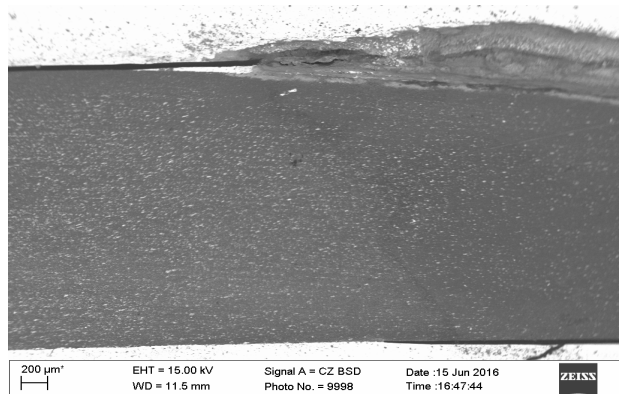
а



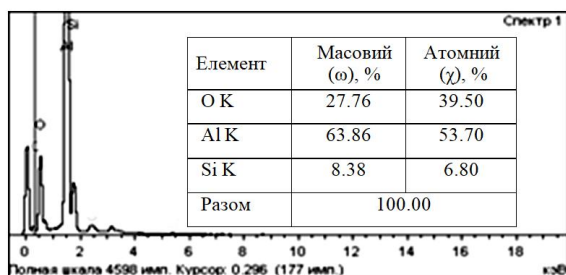
б

Рис. 4. Ділянка провідника (а), який нагрівали до температури 250 °С з подальшим охолодженням на повітрі, та вміст елементів (б) у цьому провіднику
Fig. 4. The conductor's piece (a), in which the temperature was heated to 250 °С with subsequent cooling on the air, and the content of the elements (б) in this conductor

Дослідження зразка алюмінієвого провідника, який після його нагрівання струмом КЗ далі нагрівали в муфельній печі до температури 250 °С з подальшим охолодженням на повітрі (рис. 5), показало, що масовий вміст кисню $\omega(O)$ складає 27,76 %, алюмінію $\omega(Al) = 63,86$ % та силіцію $\omega(Si) = 8,38$ %.



а



б

Рис. 5. Ділянка провідника (а), в якому після КЗ відбулося нагрівання до температури 250 °С з подальшим охолодженням на повітрі, та вміст елементів (б) у цьому провіднику

Fig. 5. The conductor's piece (a), in which, after the SC the temperature was heated to 250 °С, with subsequent cooling on the air, and the content of the elements (b) in this conductor

Для порівняння зміни вмісту хімічних елементів у зразках досліджуваних алюмінієвих провідників внутрішньої електричної мережі, які нагрівалися різними способами, сформовані таблиці: за допомогою муфельної печі (табл. 3), струмами КЗ з подальшим нагріванням у муфельній печі (табл. 4).

З табл. 3 можна зробити висновок, що в разі нагрівання алюмінієвих провідників у муфельній печі масовий вміст кисню $\omega(O)$ в зонах основного металу, раковин і вкладень зростає з підвищенням температури, а кількість алюмінію $\omega(Al)$ – зменшується. При досягненні температури плавлення алюмінію вміст кисню різко зменшується, а вміст

алюмінію – зростає. Слід зазначити, що за нагрівання провідників до температури 250 °С вміст кисню підвищується майже в три рази порівняно з еталоном, при цьому в зразках провідників з'являється вуглець (С).

Таблиця 3. Масовий вміст хімічних елементів у мікроструктурах провідників, які нагрівалися в муфельній печі

Table 3. Mass content of chemical elements in microstructures of conductors heated in a muffle furnace

№ з/п	Умови випробувань алюмінієвих провідників	O, %	Al, %	C, %
1	Еталон. Спектр №1	10,30	89,70	-
2	Т – 250 °С, охолодження на повітрі. Спектр №1	38,87	42,92	12,81
3	Т – 450 °С, охолодження на повітрі. Спектр №1	43,62	49,84	-
4	Т – 650 °С, охолодження на повітрі. Спектр №1	26,55	70,21	-
5	Еталон. Спектр №2	11,27	85,45	-
6	Т – 250 °С, охолодження на повітрі. Спектр №2	39,45	34,54	20,45
7	Т – 450 °С, охолодження на повітрі. Спектр №2	55,04	32,23	-
8	Т – 650 °С, охолодження на повітрі. Спектр №2	44,67	55,33	-
9	Еталон. Спектр №3	9,50	76,20	-
10	Т – 250 °С, охолодження на повітрі. Спектр №3	31,89	62,60	5,51
11	Т – 450 °С, охолодження на повітрі. Спектр №3	44,31	55,69	-
12	(Т – 650 °С), охолодження на повітрі. Спектр №3	27,39	72,60	-

На рис. 6 наведена графічна залежність зміни масового вмісту кисню в зонах основного металу, раковин та вкладень відповідно до температури нагрівання алюмінієвого провідника.

З табл. 4 видно, що під час нагрівання взірців, які попередньо нагрівалися струмами КЗ, до температури 250 °С, 450 °С та 650 °С у зонах раковин з'являється вуглець (С).

Таблиця 4. Масовий вміст хімічних елементів у мікроструктурах провідників, в яких відбулося КЗ з подальшим нагріванням у муфельній печі

Table 4. Bulk content of chemical elements in microstructures of conductors in which a short circuit occurred with subsequent heating in a muffle furnace

№ з/п	Умови випробувань алюмінієвих провідників	O, %	Al, %	C, %
1	КЗ – (Т – 20 °С), охолодження на повітрі. Спектр №1А	14,09	74,60	-
2	КЗ – (Т – 250 °С), охолодження на повітрі. Спектр №1	27,76	63,86	-
3	КЗ – (Т – 450 °С), охолодження на повітрі. Спектр №1	19,13	76,08	-
4	КЗ – (Т – 650 °С), охолодження на повітрі. Спектр №1	21,44	67,54	-
5	КЗ – (Т – 20 °С), охолодження на повітрі. Спектр №2	9,28	61,42	-
6	КЗ – (Т – 250 °С), охолодження на повітрі. Спектр №2	31,20	48,52	20,28
7	КЗ – (Т – 450 °С), охолодження на повітрі. Спектр №2	15,78	79,63	4,60
8	КЗ – (Т – 650 °С), охолодження на повітрі. Спектр №2	30,91	58,00	11,09
9	КЗ – (Т – 20 °С), охолодження на повітрі. Спектр №3	9,76	75,71	-
10	КЗ – (Т – 250 °С), охолодження на повітрі. Спектр №3	18,81	77,44	-
11	КЗ – (Т – 450 °С), охолодження на повітрі. Спектр №3	14,38	84,68	-
12	КЗ – (Т – 650 °С), охолодження на повітрі. Спектр №3	19,76	40,74	25,59

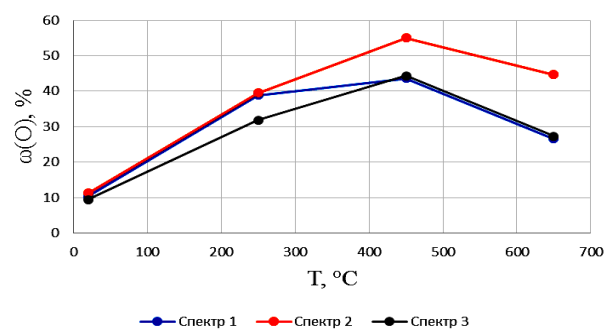


Рис. 6. Графічна залежність зміни масового складу кисню в досліджуваних зразках: спектр 1 – зона основного металу; спектр 2 – зона раковин; спектр 3 – зона включень

Fig. 6. Graphical dependence of the change in the mass composition of oxygen in the samples under study: spectrum 1 – zone of the base metal; spectrum 2 – zone of shells; spectrum 3 – zone of inclusions

Нагрівання провідника, який попередньо був нагрітий струмом КЗ, до температури 250 °С призводить до зростання масового вмісту кисню $\omega(O)$: у зоні основного металу – в 1,7 раза, у зоні раковин – у 2,3 раза, у зоні включень – в 1,7 раза порівняно зі взірцем, в якому протікав струм КЗ при кімнатній температурі.

Після подальшого нагрівання у муфельній печі масовий вміст кисню помітно знижується, а за досягнення температури 450 °С – знову починає зростати.

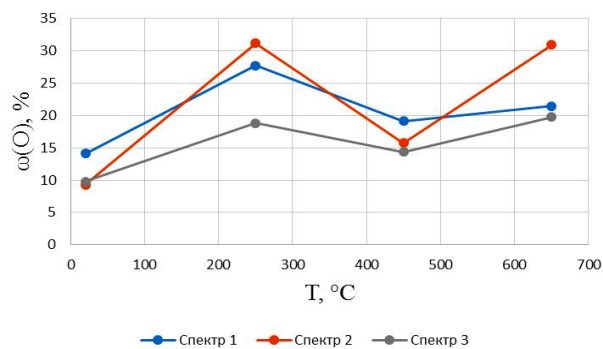


Рис. 7. Графічна залежність зміни масового складу кисню в досліджуваних зразках, які були попередньо нагріті струмом КЗ: спектр 1 – зона основного металу; спектр 2 – зона раковин; спектр 3 – зона включень

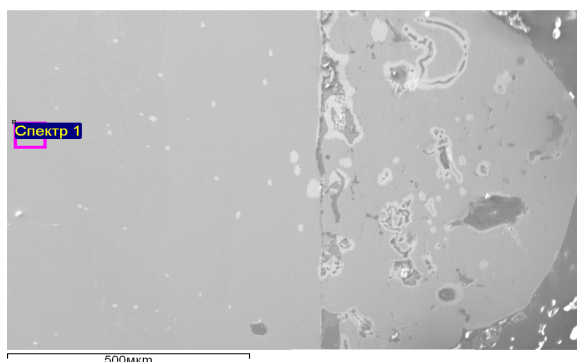
Fig. 7. Graphic dependence of changes in mass composition of oxygen in the studied samples, which were preheated by a short-circuit current: spectrum 1 – zone of the base metal; spectrum 2 – zone of shells; spectrum 3 – zone of inclusions

На рис. 7 зображена графічна залежність зміни масового вмісту кисню в зонах основного

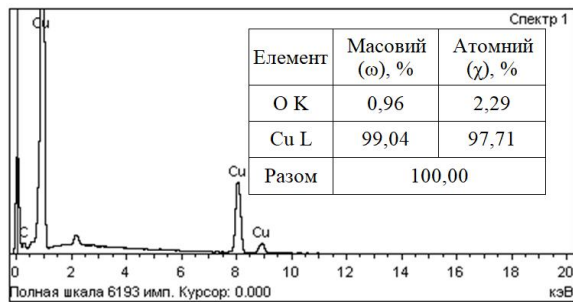
металу, раковин та включень відповідно до температури нагріву алюмінієвого провідника, який попередньо був нагрітий струмом КЗ.

З рис. 7 видно, що для всіх спектрів найбільший вміст кисню у зонах основного металу, раковин і включень спостерігається за температури 250 °С, а подальше нагрівання до температури 450 °С зменшує вміст кисню в основному металі практично вдвічі. Подібна закономірність спостерігається і в разі нагрівання мідних провідників, лише для інших значень температур [4; 18].

Проаналізувавши ділянку мідного провідника, в якому відбулося КЗ з подальшим охолодженням на повітрі, виявили, що масовий вміст кисню в зоні основного металу становить $\omega(O) = 0,96 \%$, а міді $\omega(Cu) = 99,04 \%$ (рис. 8).



а

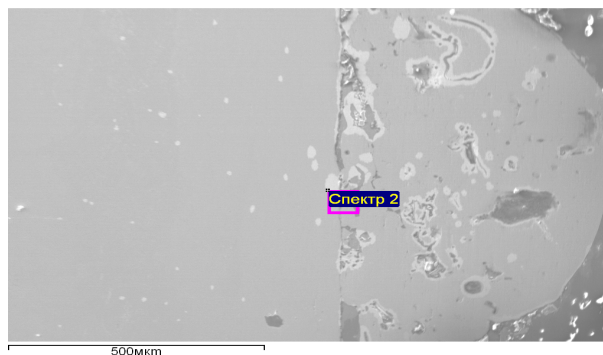


б

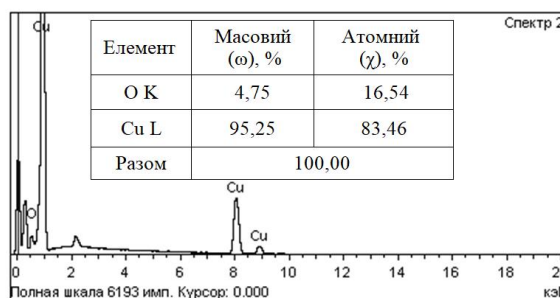
Рис. 8. Ділянка мідного провідника, в якому відбулося КЗ з подальшим охолодженням на повітрі, у зоні основного металу (а) та вміст елементів (б) у цій зоні провідника

Fig. 8. The piece of cooper conductor (а), in which the SC occurred with subsequent cooling on the air, and the content of elements (б) in this zone of conductor

Під час дослідження ділянки провідника, в якому відбулось КЗ з подальшим охолодженням на повітрі, виявили, що масовий вміст кисню в зоні оплавлення становить $\omega(O) = 4,75 \%$, а міді $\omega(Cu) = 95,25 \%$ (рис. 9).



а



б

Рис. 9. Ділянка мідного провідника, в якому відбулося КЗ з подальшим охолодженням на повітрі, в зоні оплавлення (а) та вміст елементів (б) у цій зоні провідника

Fig. 9. The piece of cooper conductor, in which the SC occurred with subsequent cooling on the air, in the melting zone (а) and the content of the elements (б) in this zone of conductor

Дослідження ділянки провідника в зоні основного металу, у якій після КЗ відбулося нагрівання до температури 400 °С з подальшим охолодженням на повітрі, показали, що масовий вміст кисню становить $\omega(O) = 1,01 \%$, а міді $\omega(Cu) = 98,99 \%$ (рис. 10).

Аналіз зони напливу мідного провідника, у якому після КЗ відбулось нагрівання до температури 400 °С з подальшим охолодженням на повітрі, показав, що масовий вміст кисню становить $\omega(O) = 2,05 \%$, а міді $\omega(Cu) = 97,99 \%$.

Дослідження ділянки провідника, в якому після КЗ відбулося нагрівання до температури 600 °С з подальшим охолодженням на повітрі, показало, що масовий вміст кисню становить $\omega(O) = 1,76 \%$, а міді $\omega(Cu) = 93,25 \%$ (рис. 11).

Аналіз зони напливу, що утворилась після КЗ при нагріванні до температури 600 °С з подальшим охолодженням на повітрі, показує, що масовий вміст кисню становить $\omega(O) = 2,55 \%$, а міді $\omega(Cu) = 97,45 \%$.

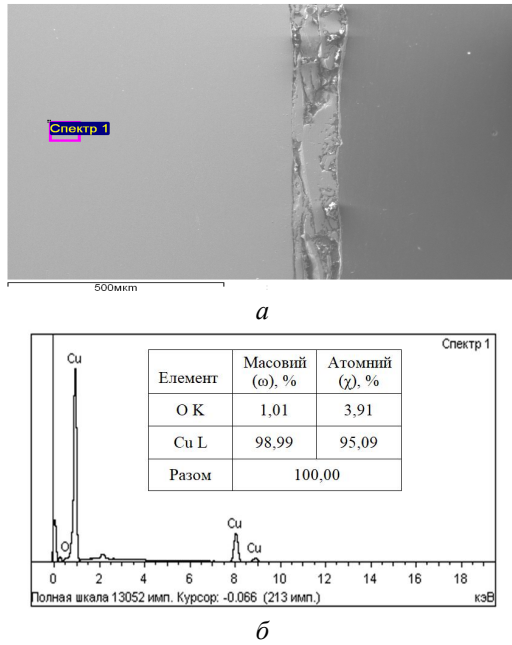


Рис. 10. Ділянка мідного провідника в зоні основного металу (а), в якому після КЗ відбулось нагрівання до температури 400 °С з подальшим охолодженням на повітрі, та вміст елементів (б) у цій зоні провідника

Fig. 10. The piece of cooper conductor in the zone of base metal (a), in which, after the SC, the temperature was heated to 400 °С, followed by cooling on the air, and the content of the elements (б) in this zone of conductor

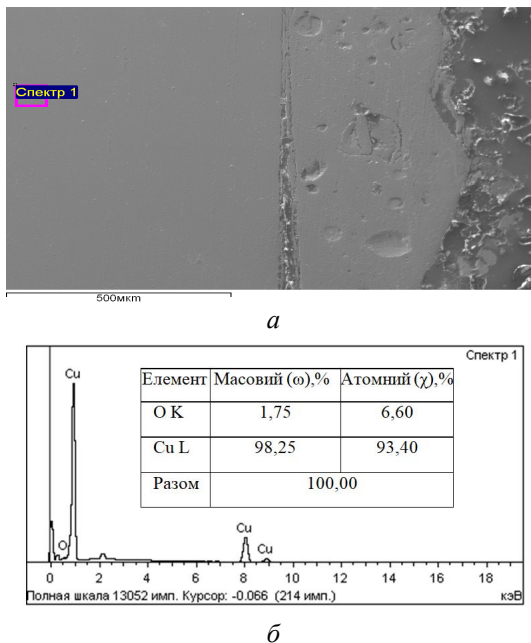


Рис. 11. Ділянка мідного провідника (а), в якому після КЗ відбулося нагрівання до температури 600 °С з подальшим охолодженням на повітрі, та вміст елементів (б) у цьому провіднику

Fig. 11. The piece of cooper conductor (a), in which, after the SC, the temperature was heated to 600 °С, followed by cooling on the air, and the content of elements (б) in this conductor

У зоні основного металу мідного провідника (рис. 12), в якому після КЗ відбулось нагрівання до температури 800 °С з подальшим охолодженням на повітрі, масовий вміст кисню становить $\omega(\text{O}) = 1,75\%$ та міді $\omega(\text{Cu}) = 98,25\%$.

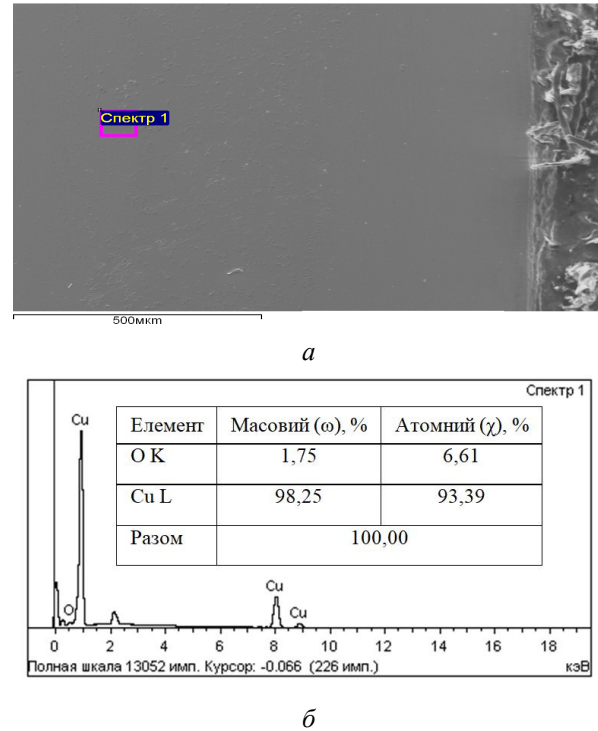


Рис. 12. Ділянка мідного провідника в зоні основного металу (а), в якому після КЗ відбулося нагрівання до температури 800 °С з подальшим охолодженням на повітрі, та вміст елементів (б) у цій зоні провідника

Fig. 12. The piece of cooper conductor in the zone of base metal (a), in which, after the SC, the temperature was heated to 800 °С, followed by cooling on the air, and the content of the elements (б) in this zone of conductor

Проаналізувавши ділянку мідного провідника, який після КЗ нагрівали до температури 800 °С з подальшим охолодженням на повітрі, виявили, що у зоні напливу масовий вміст кисню становить $\omega(\text{O}) = 1,21\%$, а міді $\omega(\text{Cu}) = 98,79\%$.

Дослідження ділянки провідника, який після КЗ нагрівали до температури 750...800 °С з подальшим охолодженням на повітрі, показали, що в зоні основного металу масовий вміст кисню становить $\omega(\text{O}) = 1,95\%$, а міді $\omega(\text{Cu}) = 98,05\%$.

Під час дослідження ділянки провідника, який після КЗ нагрівали до температури 750...800 °С з подальшим охолодженням на повітрі, встановлено, що в зоні напливу масовий вміст кисню становить $\omega(\text{O}) = 2,31\%$, а міді $\omega(\text{Cu}) = 97,69\%$.

З метою опрацювання та узагальнення результатів досліджень визначення вмісту кисню в мідних провідниках внутрішніх електричних мереж житлових та громадських будівель, які побували у вищенаведених умовах, сформовано табл. 5. Основним показником цього дослідження є масовий вміст кисню в мікроструктурі досліджуваного провідника в різних зонах (зона основного металу та зона напливу).

Таблиця 5. Вміст кисню в мікроструктурах мідних провідників

Table 5. Oxygen content in microstructures of copper conductors

№ з/п	Умови охолодження мідних провідників	O, %	Cu, %
Зона основного металу			
1	КЗ – МВ (Т – 400 °С), охолодження на повітрі	1,01	98,99
2	КЗ – МВ (Т – 600 °С), охолодження на повітрі	1,75	98,25
3	КЗ – МВ (Т – 800 °С), охолодження на повітрі	1,75	98,25
4	МВ (Т – 750...800 °С), охолодження на повітрі 30 хв	1,95	98,05
5	КЗ – (Т – 20 °С), охолодження на повітрі	0,96	99,04
Зона напливу			
6	КЗ – МВ (Т – 400 °С), охолодження на повітрі	2,05	97,23
7	КЗ – МВ (Т – 600 °С), охолодження на повітрі	2,55	97,45
8	КЗ – МВ (Т – 800 °С), охолодження на повітрі	1,21	98,79
9	МВ (Т – 750...800 °С), охолодження на повітрі 30 хв	2,31	97,69
10	КЗ – (Т – 20 °С), охолодження на повітрі	4,75	95,25

Примітка. КЗ – нагрівання струмом короткого замикання, МВ – нагрівання в модельному вогнищі, КЗ-МВ – комбіноване нагрівання струмом короткого замикання та полум'ям модельного вогнища.

Висновки. 1. Виконання досліджень методом локального рентгеноспектрального аналізу дає змогу визначити вміст кисню (похибка не перевищує 10 %) в алюмінієвих та мідних провідниках за принципом індивідуальності спектрів та є дієвим для виявлення причетності кабельно-провідникових виробів до виникнення пожеж.

2. На основі експериментального дослідження встановлено, що для виявлення мікро-

структури алюмінієвих провідників найефективнішим є травник на основі розчину плавикової кислоти 0,5 см³ і води 99,5 см³, тоді як використання травника на основі 5...10 % гідроксиду натрію, підігрітого до температури 70 °С, не лише не дає змоги повною мірою виявити мікроструктуру алюмінієвого провідника, але й вимагає більших затрат часу.

3. Використання методу локального рентгеноспектрального аналізу поперечних і поздовжніх шліфів алюмінієвих та мідних провідників внутрішніх електричних мереж, які побували в умовах пожеж, показав, що при нагріванні алюмінієвих провідників масовий вміст кисню $\omega(O)$ в зонах основного металу, раковин і вкладень зростає з підвищенням температури, а кількість алюмінію $\omega(Al)$ зменшується. У разі збільшення температури нагрівання провідників до температури плавлення алюмінію вміст кисню різко зменшується, а вміст алюмінію – зростає. Слід зазначити, що при нагріванні провідників до температури 250 °С вміст кисню підвищується майже втричі порівняно з еталоном, при цьому в зразках провідників з'являється вуглець (С).

4. Експериментальні дослідження поперечних і поздовжніх шліфів алюмінієвих провідників методом локального рентгеноструктурного аналізу виявили, що в разі їх нагрівання конвективним способом вуглець проявляється лише у взірцях, нагрітих до температури 250 °С, тоді як під час КЗ з подальшим нагріванням вуглець проявляється у взірцях, нагрітих до температури 250, 450 і 650 °С.

5. На основі проведення експериментальних досліджень встановлено, що КЗ призводить до підвищення вмісту кисню в поверхневому шарі провідника. При цьому найбільший вміст кисню спостерігається в зонах утворених раковин та включень, а також у переході «розплавлений – нерозплавлений метал». Ці дані можуть бути використані для підтвердження того, що власне КЗ було першопрчиною загоряння.

Бібліографічний список

1. Гудим В. І., Назаровець О. Б. Аналіз існуючої бази методів дослідження причетності аварійних режимів електромережі до виникнення пожежі. *Техногенна безпека: теорія, практика, інновації*: зб. тез II Міжнар. наук.-практ. конф. Львів: ЛДУ БЖД, 2011. С. 67–69.
2. Гудим В., Карбонічек М., Назаровець О. Аналіз мікроструктури мідних кабельно-провідникових виробів електричних мереж, які перебували у середовищі пожежі. *Пожежна безпека*. 2012. № 20. С. 144–149.
3. Гудим В. І., Мнухін А. Г., Назаровець О. Б., Янків В. В. Дослідження причетності електричних мереж до виникнення пожеж на шахтах. *Уголь України*. 2016. № 11–12. С. 29–32.

4. Гудим В. І., Назаровець О. Б., Кузін О. А. Особливості мікроструктури мідних дрітків, нагрітих електричним струмом і відкритим полум'ям. *Пожежна безпека*. 2012. № 22. С. 55–60.
5. Исхаков Х. И., Пахомов А. В., Каминский Я. Н. Пожарная безопасность автомобиля. Москва: Транспорт, 1987. 86 с.
6. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение: учеб. для высш. техн. учеб. заведений. 3-е изд., перераб. и дополн. Москва: Машиностроение, 1990. 528 с.
7. Мальцев М. В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов (с приложением атласа макро- и микроструктур). 2-е изд., перераб. и дополн. Москва: Металлургия, 1970. 343 с.
8. Офіційний сайт Центру пожежної статистики. URL: <http://www.ctif.org/ctif/about-ctif>.
9. Булочников Н. М., Зернов С. И., Становенко А. А., Черничук Ю. П. Пожар в автомобиле: как установить причину? Москва: Флигистон, 2006. 224 с.
10. Смелков Г. И. Пожарная безопасность электропроводок. Москва: Кабель, 2009. 328 с.
11. Статистика – ДСНС України. URL: <http://www.undicz.dsns.gov.ua/ua/Statistica.html>.
12. Babrauskas V. Mechanisms and Modes for Ignition of Low-voltage, PVC-insulated Electrotechnical Products. *Fire & Materials*. 2006. № 30. P. 150–174.
13. Béland B. Electricity...The Main Fire Cause? *Fire and Arson Investigator*. 1982. № 32. P. 18–22.
14. Xiaojun C., Lizhong Y., Zhihua D., Weicheng F. A multi-layer zone model for predicting fire behavior in a fire room. *Fire Safety Journal*. 2005. № 40. P. 267–281.
15. Fire Statistics. URL: <http://www.usfa.fema.gov/statistics/>.
16. Hall J. R., Bukowski R. W., Gomberg A. Analysis of Electrical Fire Investigations in Ten Cities (NBSIR 83-2803), [U.S.] Natl. Bur. Stand., Gaithersburg MD, 1983.
17. Lindsay T. National Electrical Grounding Research Project. Fire Protection Research Foundation, Quincy, MA, 2007.
18. Nazarovets O. B., Gudym V. I., Kuzin O. A. Features of changing the structure of copper conductors in terms of the current complex and high temperature. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. 2015. III(6), is. 54. P. 47–51.
19. Rohr K. D., The U.S. Home Product Report (Appliances and Equipment Involved in Fires), Fire Analysis & Research Div., National Fire Protection Assn., Quincy MA, 2000.
20. Smith L., McCoskrie D. What Causes Wiring Fires in Residences. *Fire Journal*. 1990. 84, 1. P. 19–24.

**Гудим В., Кузін О., Назаровець О.
МІКРОСТРУКТУРА ПРОВІДІВ ВНУТРІШНІХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ,
ЯКІ ПОБУВАЛИ В УМОВАХ ПОЖЕЖІ**

Статистичні дані причин виникнення пожеж, які відбулися впродовж останніх років, показують, що електропроводи є одним із найпоширеніших джерел загоряння, оскільки приблизно 61 % усіх пожеж, пов'язаних з електроустановками промислового та побутового призначення, виникає від кабельно-провідникових виробів. Найчастіше в процесі здійснення пожежно-технічних експертиз під час виявлення провідників зі слідами оплавлення висувається версія про їх причетність до виникнення пожежі. Проте ці оплавлення можуть утворитися і в процесі розвитку пожежі. Тому залишається актуальним питання визначення першопричини виникнення пожежі. З метою максимально наблизити умови проведення експериментальних досліджень до реальних застосовувалися різні способи нагрівання: відкритий вогонь (модельне вогнище), коротке замикання (струмові навантаження за допомогою зварювального трансформатора), конвективне нагрівання приховано прокладених провідників (муфельна піч). У статті досліджуються зміни в мікроструктурі алюмінієвих та мідних провідників внутрішніх електричних мереж під час дії на них електричного струму (коротке замикання), відкритого полум'я та нагрівання у муфельній печі. Розглянуто властивості й структуру алюмінію та міді. Мідь є кристалічним матеріалом, тобто характеризується тривимірною періодичністю в розташуванні атомів. При цьому конкретне розташування атомів і відстані між ними різні для різних металів, сукупність атомів утворює кристалічну ґратку. Проведено експерименти різних режимів нагрівання провідників електричних мереж. На основі локального рентгеноспектрального аналізу сформовані залежності вмісту кисню та показано відмінності в мікроструктурі провідників залежно від режиму нагрівання. Наведені результати дають змогу підвищити достовірність встановлення причин виникнення пожеж.

Ключові слова: мікроструктура провідників, електричні мережі, локальний рентгеноспектральний аналіз, вміст кисню, коротке замикання.

Hudym V., Kuzin O., Nazarovets O.

RESEARCH OF MICROSTRUCTURE OF WIRES OF INTERNAL ELECTROMAGNETIC FUEL IN FIRE CONDITIONS

The article shows the current state and problems associated with the features of the construction of internal electrical networks, as well as problems associated with their fire danger. The official statistics presented are alarming

and compel to seek ways and methods for an objective assessment of the reasons for the reasonableness of the internal electrical networks of these buildings before the occurrence of fires.

As shown in the paper, the methods used to detect the causes of fire today have significant disadvantages and therefore in many cases do not allow proper identification or confirmation of the primary causes of fire. In connection with this, the root causes of the fire are short circuit modes in the internal electricity grid, or violation of the rules of use of household electric heating devices, in particular the modes of their overloads.

In reality, these pointers are somewhat inflated, therefore, the task is to improve the technique of detecting the involvement of wires of internal electrical networks, or electrical equipment, which can lead to overloads or short circuits, until a fire is established. To this end, the authors carried out a large amount of experiments with copper and aluminum wires of electric current that would reproduce the real conditions, and the results of these experiments after their generalization allowed to improve the technique of fire and technical expertise.

Therefore, the issue of determining the root cause of the fire remains relevant. In order to maximally approximate the conditions of carrying out experimental research into real, different methods of heating were carried out: open fire (model fire), short circuit (current loads using a welding transformer), convective heating of hidden conductive conductors (muffle furnace). The article deals with changes in the microstructure of aluminum and copper conductors of internal electrical networks during the action of electric current (short circuit), open flame and heating in a muffle furnace. The properties and structure of aluminum and copper are considered. Copper is a crystalline material, that is, it is characterized by a three-dimensional periodicity in the arrangement of atoms. In this case, the specific location of atoms and the distance between them are different for different metals, the totality of atoms forms a crystal lattice. Experiments of different modes of heating conductors of electric networks have been carried out. On the basis of the local X-ray spectral analysis, the oxygen content dependences are formed and the differences in the microstructure of the conductors are shown, depending on the heating regime. The given results allow to determine the involvement of the electric current before the fire.

Key words: microstructure of conductors, electrical networks, local x-ray spectral analysis, oxygen content, short circuit.

Стаття надійшла 18.11.2018