

*В.І. Гудим^{1,2}, д-р техн. наук, професор,
А.Г. Мнухін³, д-р техн. наук, с.н.с., О.Б. Назаровець¹, д-р техн. наук
(¹Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
²Краківська політехніка, ³Запорізька державна інженерна академія)*

ВИЗНАЧЕННЯ ПРИЧЕТНОСТІ МІДНИХ ПРОВІДНИКІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ДО ВИНИКНЕННЯ ПОЖЕЖ НА ОСНОВІ ЛОКАЛЬНОГО РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

Представлено результати досліджень зміни вмісту кисню у мідних провідниках електричних мереж при протіканні струмів різної величини та різних умов охолодження на основі методу локального рентгеноспектрального аналізу за принципом індивідуальності спектрів. За результатами досліджень встановлені особливості зміни структури мідних провідників електромереж при різних температурних режимах. Показано доцільність використання цього методу під час встановлення причин виникнення пожеж та визначення причетності кабельно-провідникових виробів.

Ключові слова: коротке замикання, електричні мережі, вміст кисню, спектр, структура мідного провідника, нагрівання провідників.

V. Hudym, A. Mnukhin, O. Nazarovets

INFLUENCE OF COPPER WIRES IN ELECTRIC NETWORKS ON FIRE RISKS: LOCAL X-RAY SPECTROMETRY ANALYSIS

The results of researches on the change of oxygen content in the copper wires of electric networks in conditions of different current intensities and different terms of cooling are presented. The results are obtained on the basis of local x-ray spectrometry analysis using the principle of spectrums' individualities. The main features of copper wires' structure changes at different temperature conditions are determined. The efficiency of using this method with the aim of fire origins establishment is shown.

Key words: short circuit, electric networks, content of oxygen, spectrum, structure of copper explorer, heating of explorers.

Вступ. У багатьох випадках електричні мережі напругою до 1000 В є причиною виникнення пожеж в спорудах різного призначення. Після ліквідації пожежі не завжди можливо встановити першопричину її виникнення оскільки існуючі методи не дають однозначної відповіді на ці запитання.

Часто у результаті експертиз, які виконані з використанням широковживаних методик, відповіді на жаль бувають протилежні, що підтверджує необхідність вдосконалення та розробки методів досліджень електричних провідників, які побували у середовищі пожежі, щодо їх причетності до загоряння. При дослідженні причини утворення оплавлень на провідниках електричних мереж, слід встановити природу їх утворення. Якщо вони утворилися під дією струмів короткого замикання (КЗ), то потрібно визначити, в яких умовах навколишнього середовища протікало це коротке замикання [1-4].

Для дослідження природи оплавлень мідних провідників електромереж використовуються методи візуального, металографічного та рентгеноструктурного аналізу, які не завжди дають однозначну відповідь про причину виникнення пожежі [5].

Постановка задачі. У зв'язку з цим виникла задача пошуку та обґрунтування такого методу і апаратури, з використанням якої він реалізується, що дало б змогу знизити можливість помилки та дало б відповідь про роль навантаження провідників електричних мереж у виникненні пожежі. Відомо, що мідні провідники під впливом температури та середовища, в якому вони перебувають, здатні змінювати свою структуру, а також хімічний склад [6].

Враховуючи сучасний рівень технічного забезпечення та методів дослідження структур металів ці зміни можна дослідити за допомогою методу локального рентгеноспектрального аналізу, що значно знижує ризик помилки під час визначення причетності електромереж до виникнення пожеж [7].

Розв'язання задачі. З цією метою ми провели дослідження мідних провідників електричних мереж, які реально були причиною виникнення загорянь.

Суть експериментального дослідження полягає у визначенні впливу полум'я пожежі на мікроструктуру мідних провідників електромереж, в яких відбулося коротке замикання з подальшим загорянням. Як елементи електричних мереж використовувались мідні провідники із ПВХ-ізоляцією, різного поперечного перерізу довжиною 1 м, у яких протікали струми КЗ.

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

Температурні режими створювались за допомогою модельного вогнища класу А з температурними межами 20-800 °С. Виконання дослідів проводилося в послідовності, яка подана в табл. 1.

Таблиця 1

Умови проведення експериментів

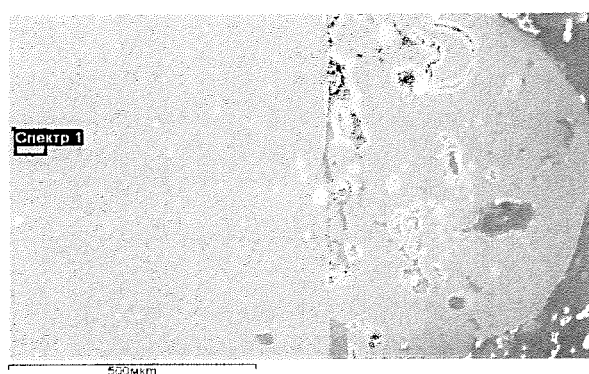
№ з/п	Температура середовища, °С	Примітка
1.	20	КЗ відбулось за температури 20 °С. Провідники поступово охолоджувались на повітрі (Т = 20 °С).
2.	20	КЗ відбулось за температури 20 °С. Провідники охолоджувались водою (Т = 10 °С).
3.	400	Провідники перебували в модельному вогнищі 10 хв та після вилучення поступово охолоджувались на повітрі (Т = 20 °С).
4.	400	Провідники перебували в модельному вогнищі 10 хв та після вилучення охолоджувались водою (Т = 10 °С).
5.	600	Провідники перебували в модельному вогнищі 15 хв та після вилучення поступово охолоджувались на повітрі (Т = 20 °С).
6.	600	Провідники перебували в модельному вогнищі 15 хв та після вилучення охолоджувались водою (Т = 10 °С).
7.	800	Провідники перебували в модельному вогнищі 20 хв та після вилучення поступово охолоджувались на повітрі (Т = 20 °С).
8.	800	Провідники перебували в модельному вогнищі 20 хв та після вилучення охолоджувались водою (Т = 10 °С).
9.	750 - 800	Провідники перебували в модельному вогнищі 30 хв та після вилучення поступово охолоджувались на повітрі (Т = 20 °С).
10.	750 - 800	Провідники перебували в модельному вогнищі 30 хв та після вилучення охолоджувались водою (Т = 10 °С).

Дослідження зміни хімічного складу провідників під час КЗ виконувались методом локального рентгеноспектрального аналізу в зоні утворення оплавлень (на поверхні провідника) та основного металу [3].

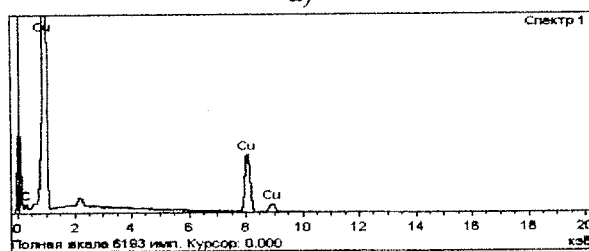
Локальні рентгеноспектральні дослідження виконували за допомогою скануючого електронного мікроскопа ZEISS EVO 40XVP з системою рентгенівського мікроаналізу INCA Energy, який дає змогу досліджувати зразки при різних збільшеннях, а також досліджувати окремі ділянки (спектри) [4].

Проаналізувавши ділянку провідника в зоні основного металу (спектр 1), у якому відбулось КЗ із подальшим охолодженням на повітрі, виявлено, що масовий вміст кисню становить $\omega(\text{O}) = 0,96\%$ та міді $\omega(\text{Cu}) = 99,04\%$ (рис. 1).

Під час дослідження ділянки провідника, в зоні оплавлення (спектр 2), у якому відбулось КЗ із подальшим охолодженням на повітрі, показано, що масовий вміст кисню становить $\omega(\text{O}) = 4,75\%$, а міді $\omega(\text{Cu}) = 95,25\%$ (рис. 2).



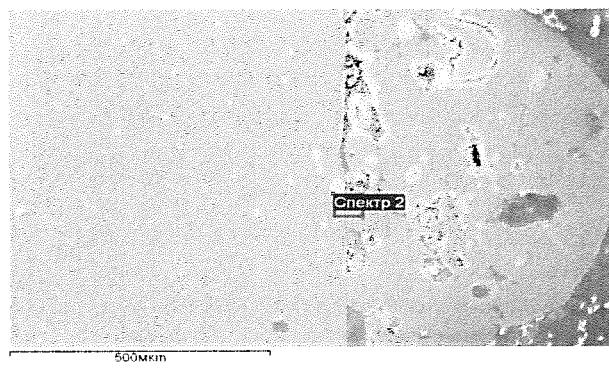
а)



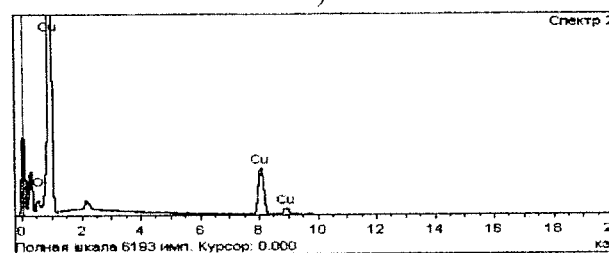
Елемент	Масовий (ω), %	Атомний (χ), %
О К	0,96	2,29
Cu L	99,04	97,71
Разом	100,00	

б)

Рисунок 1 – Ділянка провідника (а), спектр 1 та вміст елементів (б), у якому відбулось КЗ із подальшим охолодженням на повітрі



а)



Елемент	Масовий (ω), %	Атомний (χ), %
О К	4,75	16,54
Cu L	95,25	83,46
Разом	100,00	

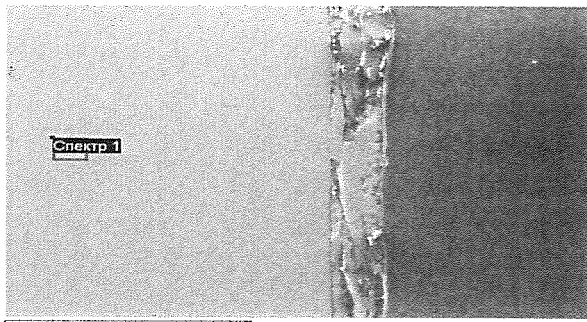
б)

Рисунок 2 – Ділянка провідника (а), спектр 2 та вміст елементів (б), у якому відбулось КЗ із подальшим охолодженням на повітрі

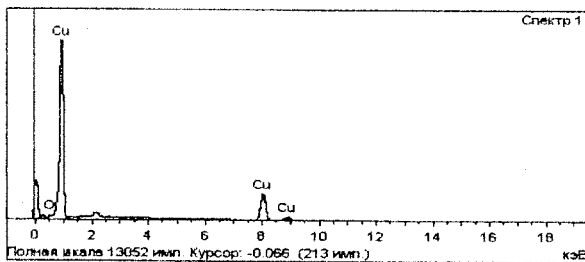
Локальний рентгеноспектральний аналіз зразка, у якому відбулось КЗ із подальшим охолодженням у воді, показав, що масовий вміст кисню в зоні основного металу становить $\omega(\text{O}) = 1,53\%$, а міді $\omega(\text{Cu}) = 98,47\%$. Аналіз зони напливу, що утворилась під час КЗ із подальшим охолодженням у воді, показує, що масовий вміст кисню становить $\omega(\text{O}) = 8,10\%$ та міді $\omega(\text{Cu}) = 91,90\%$.

Дослідження ділянки провідника в зоні основного металу (спектр 1), у якій після КЗ відбулось нагрівання до температури 400 °С із подальшим охолодженням на повітрі, показали, що масовий вміст кисню становить $\omega(\text{O}) = 1,01\%$, а міді $\omega(\text{Cu}) = 98,99\%$ (рис. 3). Аналіз зони напливу (спектр 2) мідного провідника, у якому після КЗ відбулось нагрівання до температури 400 °С із подальшим охолодженням на повітрі, показав, що масовий вміст кисню становить $\omega(\text{O}) = 2,05\%$, а міді $\omega(\text{Cu}) = 97,99\%$.

Аналіз зразка в зоні основного металу (спектр 1), у якому після КЗ відбулось нагрівання до температури 400 °С із подальшим охолодженням у воді (рис. 4) показав, що масовий вміст кисню становить $\omega(\text{O}) = 1,71\%$, а міді $\omega(\text{Cu}) = 98,29\%$.



а)



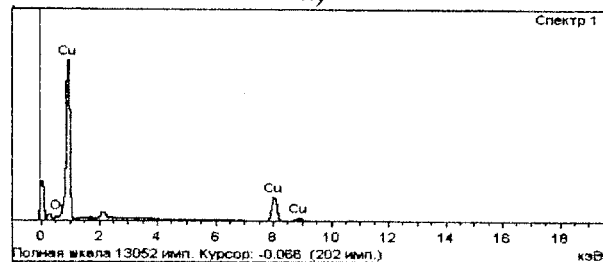
Елемент	Масовий (ω), %	Атомний (χ), %
О К	1,01	3,91
Сu L	98,99	95,09
Разом	100,00	

б)

Рисунок 3 – Ділянка провідника (а), (спектр 1) та вміст елементів (б), у якому після КЗ відбулось нагрівання до температури 400°С із подальшим охолодженням на повітрі



а)



Елемент	Масовий (ω), %	Атомний (χ), %
О К	1,71	6,45
Сu L	98,29	93,55
Разом	100,00	

б)

Рисунок 4 – Ділянка провідника (а), (спектр 1) та вміст елементів (б), у якому після КЗ відбулось нагрівання до температури 400°С із подальшим охолодженням у воді

У зоні оплавлення мідного провідника (спектр 2), в якому після КЗ відбулось нагрівання до температури 400 °С із подальшим охолодженням у воді, встановлено, що масовий вміст кисню становить $\omega(\text{O}) = 2,36\%$, а міді $\omega(\text{Cu}) = 97,64\%$.

Під час дослідження ділянки провідника, (спектр 1) у якому після КЗ відбулось нагрівання до температури 600 °С із подальшим охолодженням на повітрі, показано, що масовий вміст кисню становить $\omega(\text{O}) = 1,76\%$ та міді $\omega(\text{Cu}) = 93,25\%$ (рис. 5).

Дослідження ділянку провідника (спектр 1), у якому після КЗ відбулось нагрівання до температури 600 °С із подальшим охолодженням у воді встановлено, що масовий вміст кисню становить $\omega(\text{O}) = 2,18\%$, а міді $\omega(\text{Cu}) = 97,82\%$ (рис. 6).

Зона напливу (спектр 2), що утворилась після КЗ при нагріванні до температури 600 °С із подальшим охолодженням на повітрі, показує, що масовий вміст кисню становить $\omega(\text{O}) = 2,55\%$ та міді $\omega(\text{Cu}) = 97,45\%$.

Аналіз зони напливу (спектр 2), що утворилась після КЗ при нагріванні до температури 600 °С із подальшим охолодженням у воді, показує, що масовий вміст кисню $\omega(\text{O})$ становить 4,27%, а міді $\omega(\text{Cu}) = 95,73\%$.

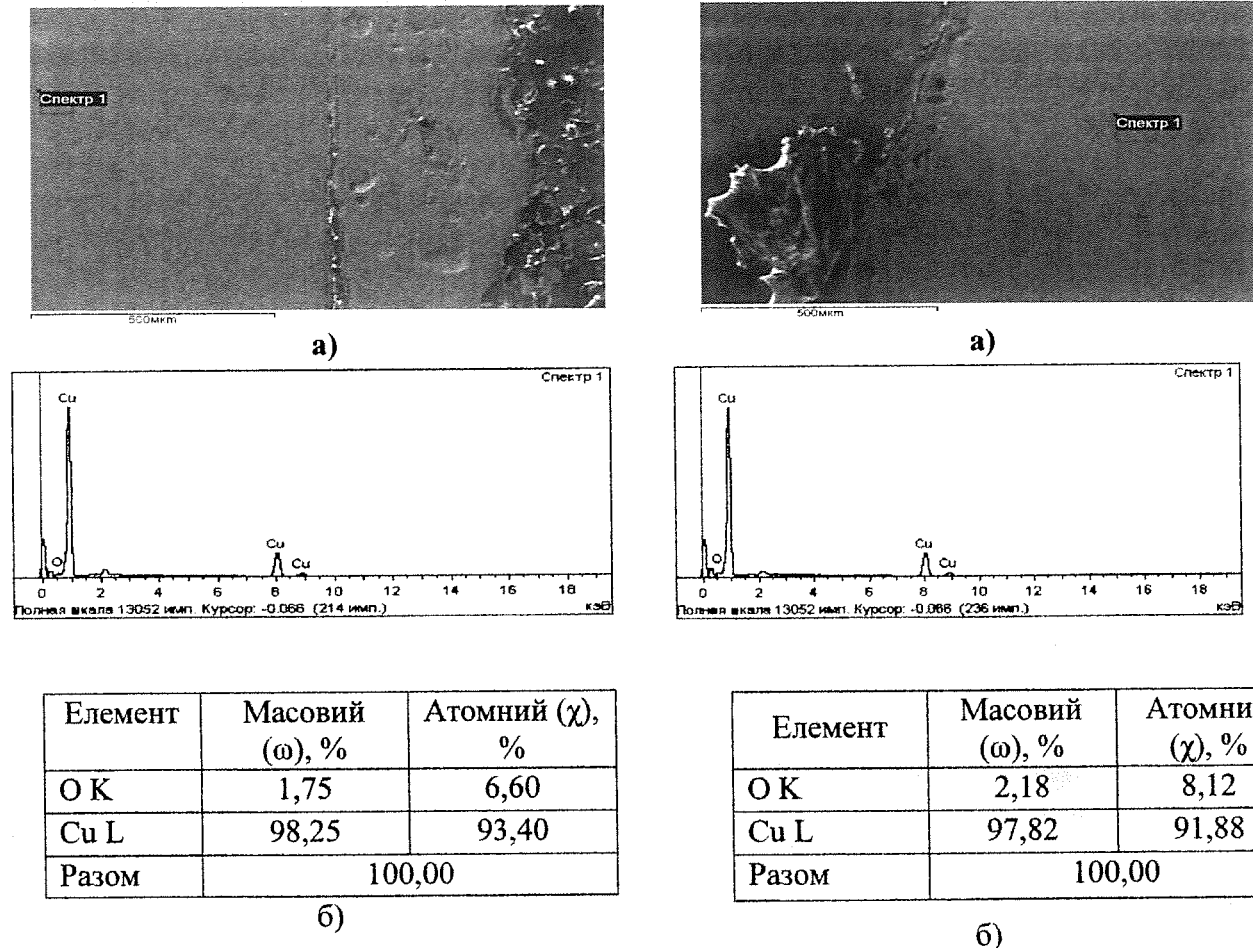


Рисунок 5 – Ділянка провідника (а), спектр 1 та вміст елементів (б), у якому після КЗ відбулось нагрівання до температури 600°С із подальшим охолодженням на повітрі

Рисунок 6 – Ділянка провідника (а), спектр 1 та вміст елементів (б), у якому після КЗ відбулось нагрівання до температури 600°С із подальшим охолодженням у воді

У зоні основного металу (міді) провідника (рис. 7), в якому після КЗ відбулось нагрівання до температури 800 °С із подальшим охолодженням на повітрі, масовий вміст кисню становить $\omega(\text{O}) = 1,75\%$ та міді $\omega(\text{Cu}) = 98,25\%$.

Локальний рентгеноспектральний аналіз зразка, у якому після КЗ відбулось нагрівання до температури 800 °С із подальшим охолодженням у воді (рис. 8), показав, що масовий вміст кисню становить $\omega(\text{O}) = 2,59\%$, а міді $\omega(\text{Cu}) = 97,41\%$.

Проаналізувавши ділянку провідника, (спектр 2), у якому після КЗ відбулось нагрівання до температури 800 °С із подальшим охолодженням на повітрі, ми виявили, що масовий вміст кисню становить $\omega(\text{O}) = 1,21\%$ та міді $\omega(\text{Cu}) = 98,79\%$.

Аналіз зони напливу (спектр 2), що утворилась після КЗ при нагріванні до температури 800 °С із подальшим охолодженням у воді, показує, що масовий вміст кисню становить $\omega(\text{O}) = 4,79\%$, а міді $\omega(\text{Cu}) = 95,21\%$.

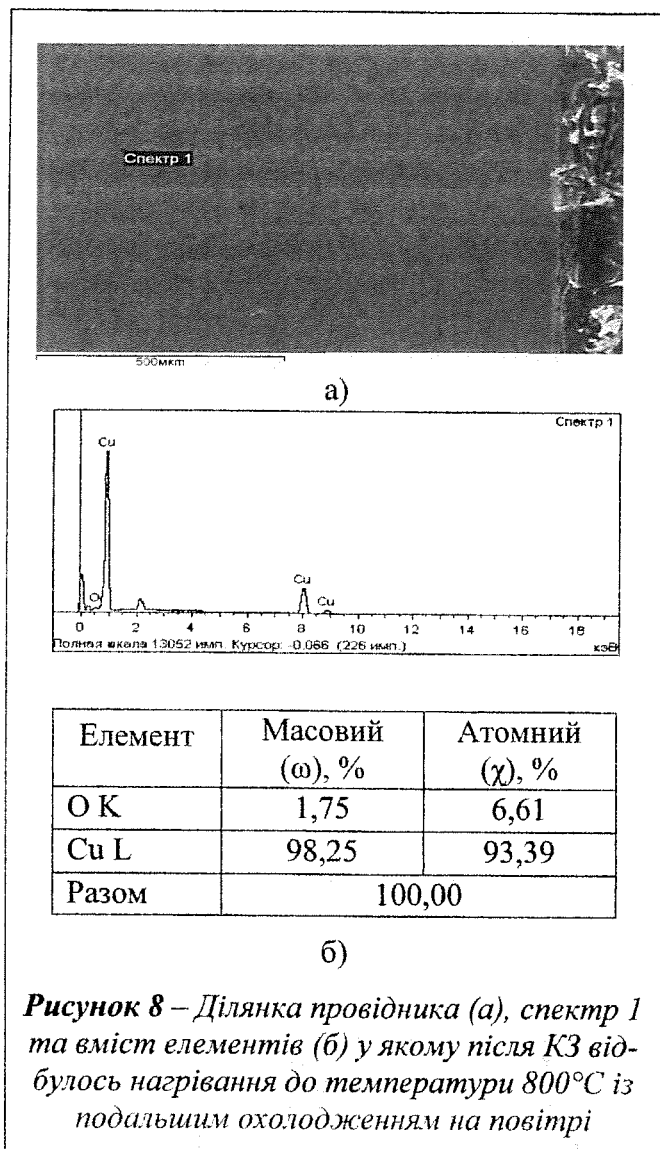


Рисунок 8 – Ділянка провідника (а), спектр 1 та вміст елементів (б) у якому після КЗ відбулось нагрівання до температури 800°C із подальшим охолодженням на повітрі

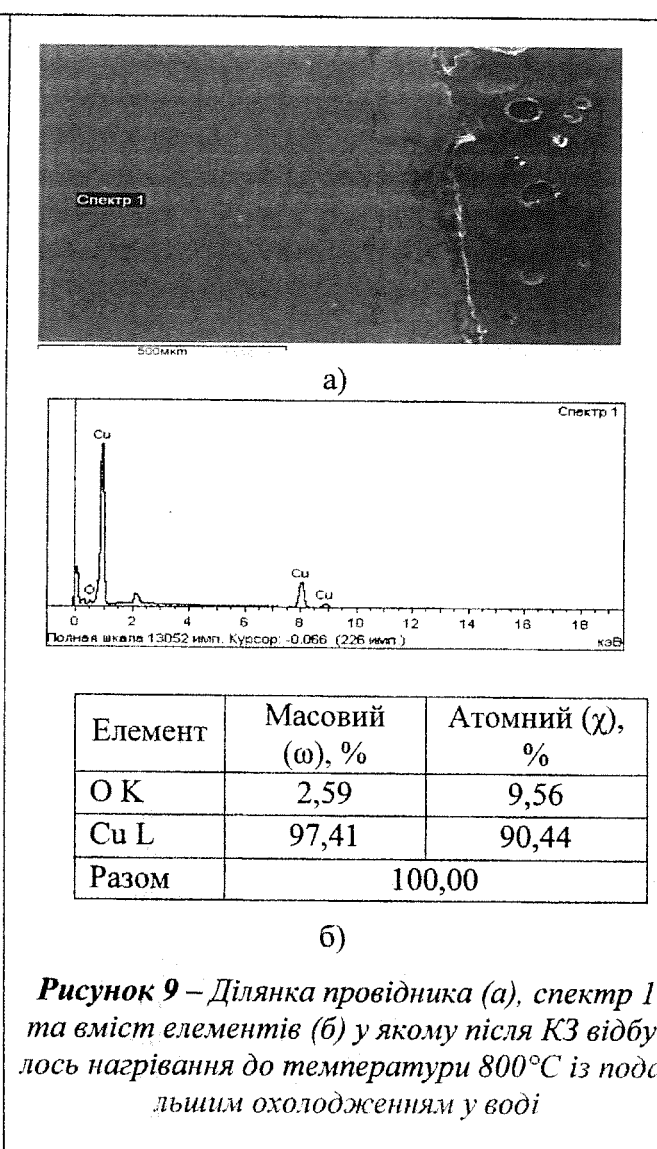


Рисунок 9 – Ділянка провідника (а), спектр 1 та вміст елементів (б) у якому після КЗ відбулось нагрівання до температури 800°C із подальшим охолодженням у воді

Дослідження ділянки провідника (спектр 1), у якій після КЗ відбулось нагрівання до температури 750-800 °С із подальшим охолодженням на повітрі, показали, що масовий вміст кисню становить $\omega(O) = 1,95\%$ та міді $\omega(Cu) = 98,05\%$.

Під час дослідження ділянки провідника, (спектр 2), у якому після КЗ відбулось нагрівання до температури 750-800 °С із подальшим охолодженням на повітрі, встановлено, що масовий вміст кисню становить $\omega(O) = 2,31\%$ та міді $\omega(Cu) = 97,69\%$.

У зоні основного металу (міді) провідника, в якому після КЗ відбулось нагрівання до температури 750-800 °С із подальшим охолодженням у воді, масовий вміст кисню становить $\omega(O) = 2,60\%$ та міді $\omega(Cu) = 97,40\%$.

У зоні напливу, що утворилась після КЗ при нагріванні до температури 750-800 °С із подальшим охолодженням у воді, масовий вміст кисню становить $\omega(O) = 11,27\%$ та міді $\omega(Cu) = 88,73\%$.

З метою опрацювання та узагальнення результатів досліджень визначення вмісту кисню у провідниках, які побували у вище наведених умовах, сформовано таблицю 2. Основним показником цього дослідження є масовий вміст кисню на поверхні досліджуваного провідника.

Таблиця 2

Вміст кисню в мікроструктурах провідників

№ з/п	Умови охолодження мідних провідників	O, %	Cu, %
Спектр 1			
1	КЗ – МВ (Т – 400 °С), охолодження на повітрі.	1,01	98,99
2	КЗ – МВ (Т – 400 °С), охолодження у воді.	1,71	98,29
3	КЗ – МВ (Т – 600 °С), охолодження на повітрі.	1,75	98,25
4	КЗ – МВ (Т – 600 °С), охолодження у воді.	2,18	97,82
5	КЗ – МВ (Т – 800 °С), охолодження на повітрі.	1,75	98,25
6	КЗ – МВ (Т – 800 °С), охолодження у воді.	2,59	97,41
7	МВ (Т – 750 - 800 °С), охолодження на повітрі 30 хв.	1,95	98,05
8	МВ (Т – 750 - 800 °С), охолодження у воді 30 хв.	2,60	97,40
9	КЗ – (Т – 20 °С), охолодження на повітрі.	0,96	99,04
10	КЗ – (Т – 20 °С), охолодження у воді.	1,53	98,47
Спектр 2			
11	КЗ – МВ (Т – 400 °С), охолодження на повітрі.	2,05	97,23
12	КЗ – МВ (Т – 400 °С), охолодження у воді.	2,36	97,64
13	КЗ – МВ (Т – 600 °С), охолодження на повітрі.	2,55	97,45
14	КЗ – МВ (Т – 600 °С), охолодження у воді.	4,27	95,73
15	КЗ – МВ (Т – 800 °С), охолодження на повітрі.	1,21	98,79
16	КЗ – МВ (Т – 800 °С), охолодження у воді.	4,79	95,21
17	МВ (Т – 750 - 800 °С), охолодження на повітрі 30 хв.	2,31	97,69
18	МВ (Т – 750 - 800 °С), охолодження у воді 30 хв.	11,27	88,73
19	КЗ – (Т – 20 °С), охолодження на повітрі.	4,75	95,25
20	КЗ – (Т – 20 °С), охолодження у воді.	8,10	91,90

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

Висновки. Виконання досліджень методом локального рентгеноспектрального аналізу дає змогу визначити вміст кисню у мідних провідниках за принципом індивідуальності спектрів та є одним з ефективних, точних, чутливих та інформативних видів якісного аналізу досліджуваних металів.

Такий метод не потребує значних затрат на підготовку зразків і одночасно дає достатньо точні дані (похибка не перевищує 10 %) про вміст кисню, який є в структурі провідника залежно від умов.

На нашу думку, метод локального рентгеноспектрального аналізу є дієвим для виявлення причетності кабельно-провідникових виробів до виникнення пожеж.

Список літератури:

1. Гудим В. І. Аналіз існуючої бази методів дослідження причетності аварійних режимів електромережі до виникнення пожежі / В. І. Гудим, О. Б. Назаровець // Техногенна безпека: теорія, практика, інновації : Збірник тез II Міжнародної науково-практичної конференції – Л. : ЛДУ БЖД, 2011. – С. 67–69.
2. Babrauskas, V., "Mechanisms and Modes for Ignition of Low-voltage, PVC-insulated Electrotechnical Products," Fire & Materials 30, 150-174, 2006.
3. Lindsay, T., "National Electrical Grounding Research Project," Fire Protection Research Foundation, Quincy, MA, 2007.

4. Smith, L. and McCoskrie, D., "What Causes Wiring Fires in Residences," Fire Journal 84:1, 19-24, 69 Jan/Feb 1990.
5. Гудим В. І. Аналіз мікроструктури мідних кабельно-провідникових виробів електричних мереж, які перебували у середовищі пожежі / В. І. Гудим, М. Карбонічек, О. Б. Назаровець // Пожежна безпека : Зб.наук. пр. – Л. : ЛДУ БЖД, 2012. – №20. – С. 144–149.
6. Лахтин Ю. М. Метериаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леоньева. –3-е изд., перераб., и доп. – М. : Машиностроение, 1990. – 528 с.
7. Гудим В. І. Дослідження причетності електричних мереж до виникнення пожеж на шахтах / В. І. Гудим, А. Г. Мнухін, О. Б. Назаровець, В. В. Янків // Уголь Украины : Ежемесячный научно-технический, производственный и экономический журнал. – Київ : 2016. – №11-12 – С. 29–32.

References:

1. Hudym V. I. Analiz isnyuychoyi bazy metodiv doslidzhennya prychetnosti avariynykh rezhymiv elektromerezh do vynyknennya pozhezhi / V. I. Hudym, O. B. Nazarovets' // Tekhnohenna bezpeka: teoriya, praktyka, innovatsiyi : Zbirnyk tez II Mizhnarodnoyi naukovopraktychnoyi konferentsiyi – L. : LDU BZHD, 2011. – S. 67–69.
2. Babrauskas, V., "Mechanisms and Modes for Ignition of Low-voltage, PVC-insulated Electrotechnical Products," Fire & Materials 30, 150-174, 2006.
3. Lindsay, T., "National Electrical Grounding Research Project," Fire Protection Research Foundation, Quincy, MA, 2007.
4. Smith, L. and McCoskrie, D., "What Causes Wiring Fires in Residences," Fire Journal 84:1, 19-24, 69 Jan/Feb 1990.
5. Hudym V. I. Analiz mikrostruktury midnykh kabel'no-providnykovykh vyrobiv elektrychnykh merezh, yaki perebuvaly u seredovyshchi pozhezhi / V. I. Hudym, M. Karbonichek, O. B. Nazarovets // Pozhezhna bezpeka : Zb.nauk. pr. – L. : LDU BZHD, 2012. – №20. – S. 144–149.
6. Lakhtyn Yu. M. Meteryalovedenye / Yu. M. Lakhtyn, V. P. Leon'eva. –3-e yzd., pererab., y dop. – M. : Mashynostroenye, 1990. – 528 s.
7. Hudym V. I. Doslidzhennya prychetnosti elektrychnykh merezh do vynyknennya pozhezhi na shakhtakh / V. I. Hudym, A. H. Mnukhin, O. B. Nazarovets, V. V. Yankiv // Uhol' Ukrainy : Ezhemesyachnyy nauchno-tekhnycheskyy, proyzvodstvennyy y ékonomycheskyy zhurnal. – Kyiv : 2016. – №11-12 – S. 29–32.

