

В.І. Гудим^{1,2}, д-р техн. наук, професор, О.Б. Назаровець¹

О.А. Кузін³, к-т техн. наук, доцент,

(¹Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

²Краківська політехніка, ³Національний університет «Львівська політехніка»)

ОСОБЛИВОСТІ МІКРОСТРУКТУРИ МІДНИХ ДРОТІВ, НАГРІТИХ ЕЛЕКТРИЧНИМ СТРУМОМ І ВІДКРИТИМ ПОЛУМ'ЯМ

Досліджуються зміни у мікроструктурі мідного дроту під час дії на нього електричного струму і відкритого полум'я. Розглянуто властивості та структуру провідникової міді. Проведено експерименти різних режимів нагрівання провідників електричних мереж. На основі металографічних досліджень показано відмінності у мікроструктурі дроту залежно від режиму нагрівання та вибраного травника. Наведені результати дають змогу визначити причетність електричного струму до виникнення пожежі.

Ключові слова: мікроструктура мідного дроту, електричні мережі, металографічне дослідження, травник.

Вступ. Протягом 2012 року в Україні зареєстровано 71443 пожежі. Щодня в Україні за цей період в середньому виникало 214 пожеж, унаслідок яких гинуло вісім та травмувалося п'ятеро людей, вогонь знищував або пошкоджував 75 будівель і споруд різного призначення та 10 одиниць техніки. Унаслідок пожеж загинуло 2751 людина, у тому числі 87 дітей; 1682 людей отримали травми, з яких 143 – діти.

Впродовж 2012 року основними причинами виникнення пожеж були: необережне поводження з вогнем (45140 пожеж або 63,2% від їх загальної кількості), порушення правил пожежної безпеки при влаштуванні та експлуатації електроустановок (13242 або 18,2%) і порушення правил пожежної безпеки при влаштуванні та експлуатації печей, теплогенеруючих агрегатів та установок (5626 або 12,3%) [1].

Статистичні дані свідчать про те, що друге місце серед основних причин виникнення пожеж із загибеллю людей займає порушення правил пожежної безпеки при влаштуванні та експлуатації електроустановок.

Основними причинами пожеж від теплових проявів електричної енергії є:

- 1) короткі замикання (КЗ) ~ 43%;
- 2) струмові перевантаження ~ 12%;
- 3) перегрів горючих матеріалів і предметів, що перебувають поблизу залишених без нагляду електронагрівальних приладів ~ 33%;
- 4) іскріння та електричні дуги ~ 3%;
- 5) створення великих перехідних опорів (ВПО) ~ 5%;
- 6) інші причини ~ 4%.

Очевидно, що ці статистичні дані є сукупними і наближеними, тому після пожеж важливо більш детально встановити причину, яка призвела до виникнення пожежі від електроустановки.

Таким чином, питання пожежної безпеки в електроустановках, а також пошук методів виявлення причин пожеж є важливим і актуальним, і потребує свого вирішення не лише на законодавчому рівні, а й у вигляді оптимальних технічних рішень.

Постановка задачі. Перед експертами завжди стоїть завдання, що стало причиною пожежі: або коротке замикання виникло через несправність електромережі (старіння та перетирання ізоляції, дотикання дротів у місцях з'єднань, виконаних скруткою, проникнення води у з'єднувальні коробки тощо), або коротке замикання сталося під час розвитку пожежі.

Виходячи з цього залишається небагато причин, які можуть призвести до загорянь від електроустановок. Перша з них – перевантаження кабельно-провідникових виробів (КПВ)

електромережі, друга – порушення правил експлуатації побутового електрообладнання і внаслідок тривалої дії струму короткого замикання, який не був обмежений запобіжною арматурою, а третя – несправність ізоляції елементів електричних мереж.

Очевидним є те, що всі зазначені причини виникнення пожеж мають різні умови, серед яких варто відзначити первинність і вторинність струму, як фактора пожежі. У зв'язку з цим необхідно розробляти і застосовувати для експертизи причин такі способи і методи, які б дали якнайточнішу оцінку передпожежної ситуації.

Теоретичні основи. Мідь має найвищу після срібла електропровідність і теплопровідність. Електропровідність і пластичність міді тим більша, чим більша чистота металу. Тому для виготовлення виробів електротехнічного призначення застосовують дві марки мідних дротів з малим вмістом домішок: М0 і М1. Хімічний склад міді цих марок має відповідати вимогам ГОСТ 859-66, згідно з яким допустимий вміст кисню в міді марки М0 не повинен перевищувати 0,04 % (для провідників струму і сплавів високої чистоти), марки М1 – 0,1 % (для провідників струму, вальцьованих високоякісних бронз, що не містять олова). Температура плавлення міді 1083 °С, температура кипіння – 2360 °С.

Кристалічна ґратка міді гранецентрована кубічна (просторова група симетрії $Fm\bar{3}m$, $a=3,615(1) \text{ \AA}$); координаційний поліедр атома Cu – кубооктаедр ($d_{\text{Cu-Cu}} 2,55(1) \text{ \AA}$).

При високих температурах ребро кубічної елементарної комірки видовжується, внаслідок посилення теплових коливань атомів.

При нагріванні міді вище температури рекристалізації (~270 °С) відбувається процес зародження та росту нових недеформованих зерен [2].

Є дві стадії рекристалізації:

- первинна (зародження нових зерен);
- збиральна (збільшення розмірів зерен).

Первинна рекристалізація полягає в зародженні у деформованій структурі недеформованих зерен та їх подальшому рості. Зерна ростуть внаслідок міграції атомів із деформованих зон до зародків новоутворених зерен. Первинна рекристалізація завершується повною заміною початкових зерен новими, переважно з іншою кристалографічною орієнтацією. Новоутворенні зерна мають невелику кількість лінійних і точкових дефектів. У результаті напруження майже зовсім знімається, міцність і твердість металу істотно зменшуються, а пластичність зростає.

Температура порогу рекристалізації $T_{\text{рекрист.}}$ пов'язана з термодинамічною температурою топлення $T_{\text{топл.}}$ металу залежністю:

$$T_{\text{рекрист.}} = \alpha \cdot T_{\text{топл.}}$$

На коефіцієнт α найбільше впливає чистота металу і пластична деформація. Для металів технічної чистоти $\alpha = 0,4$ і знижується зі збільшенням пластичної деформації. Для особливо чистих металів $\alpha = 0,1 \dots 0,2$, а для твердих розчинів (сплавів) $\alpha = 0,5 \dots 0,6$ і більше.

При незначній попередній пластичній деформації рекристалізація не відбувається. Величина мінімальної деформації, вище якої починається первинна рекристалізація, є критичною деформацією. Для міді вона становить 5%. У металах із незначною попередньою деформацією утворюються найбільші рекристалізовані зерна, а в міру її зростання розміри рекристалізованого зерна зменшуються.

Методика дослідження. Для отримання мікроструктури мідного дроту за різних температурних умов були проведені такі експериментальні дослідження: через мідні дроти пропускались струми за умов поступового збільшення струму (40-400 А), а також миттєвого значення струму 400 А. Для визначення температури використовували термометри. Інтервали часу вимірювалися за допомогою секундоміра.

Умови проведення експериментів наведені в таблиці.

Режими нагрівання досліджуваних провідників

| № з/п | Тип провідника | Струм I, [А] | Часові проміжки дії струму Δt , [с] | Температура t, [°С] | Примітка |
|-------|--------------------------------------------|--------------|---------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | Однодротикова жила* 2,5 мм ² | - | - | - | Еталонний взірець |
| 2. | Однодротикова жила* 2,5 мм ² | 400 | 10 | - | При максимальному збільшенні струму ізоляція провідника повністю не розплавилась; відбулось перепалювання |
| 3. | Однодротикова жила* 2,5 мм ² | - | - | - | Створювалось коротке замикання за допомогою зварювального трансформатора |
| 4. | Однодротикова жила* 2,5 мм ² | 400 | 10 | 660 | На дрiт спочатку діяли струмом, а потiм вiдкритим полум'ям протягом 30 хв |
| 5. | Однодротикова жила* 2,5 мм ² | 400 | 10 | 582 | На дрiт спочатку діяли струмом, а потiм вiдкритим полум'ям протягом 15 хв |
| 6. | Однодротикова жила* 2,5 мм ² | - | - | 582 | На дрiт діяли тiльки вiдкритим полум'ям протягом 15 хв |

*Допустима тривала сила струму для дротів з гумовою і полівінілхлоридною ізоляцією з мідними жилами, відкритого прокладання становить $I_{\text{доп}} = 40$ А [4].

Металографічне дослідження проводили на зразках дроту ППР з перерізом струмопровідної жили 2,5 мм². Виготовляли шліфи за наступною технологією: зразки дроту розміщали в алюмінієвих оправках, які заливали епоксидною смолою, після затвердіння зразки шліфували на абразивному папері різної зернистості та полірували за допомогою алмазної пасти.

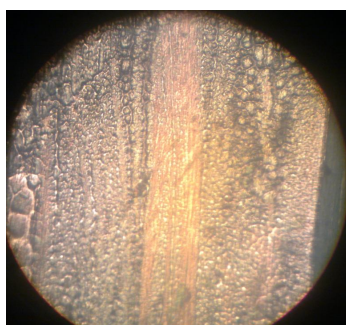
Якісну поверхню шліфа протравлювали нанесенням на поверхню різних травників:

Травник №1 – Ферум (III) хлорид гексагідрат 10 г, хлоридна кислота 25 см³, вода 100 см³.

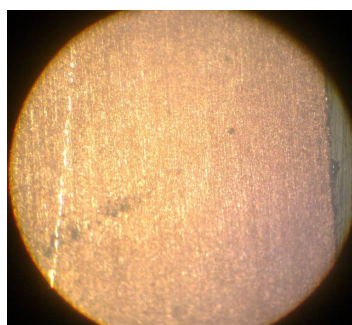
Травник №2 – Подвійна сіль амоній хлориду та купрум (II) хлориду 10 г, вода 100 см³, амоніак (до отримання нейтральної або слаболужної реакції).

Після травлення шліфи вивчали на оптичному мікроскопі (МЕТАМ Р-1) із 200-, 300-, 500- кратним збільшенням.

Результати дослідження повздовжніх шліфів представлені на рисунках 1-6.



а)



б)

Рис. 1. Мікроструктура мідного дроту у вихідному стані:
а – травник №1; б – травник №2 x300

Результати та їх обговорення. Як видно з рис. 1 мікроструктура у вихідному стані представляє собою полікристали міді, які витягнуті в напрямку деформації. Слід відмітити, що після травлення травником №1 виявляється мікроструктурна неоднорідність, на окремих ділянках з'являються зерна, які є більші за розміром, ніж середнє значення, що показане на рис. 1а. Це спостерігається як на повздовжніх, так і на поперечних шліфах. Травлення травником №2 (рис. 1б) підтверджує формування неоднорідності при волочінні (неоднорідна структура сформувалась в процесі виготовлення дроту).

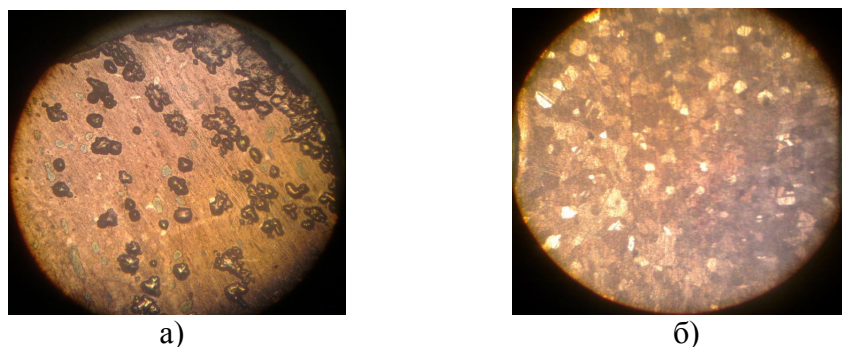


Рис.2. Мікроструктура мідного дроту при пропусканні струму 400 А протягом 10 с:
а – травник №1 x200; б – травник №2 x300

Пропускання електричного струму силою 400 А протягом 10 с призводить до суттєвих змін мікроструктури. В мікроструктурі з'являються локальні ділянки кулеподібної форми, що свідчить про оплавлення і наступну швидку кристалізацію, яка призводить до утворення локальних ділянок у вигляді круглих форм (рис. 2а). Оплавлені ділянки виявляються як при травленні травником №1, так і при травленні травником №2 (рис. 2б). Слід відмітити, що на рис. 2 замість зерен, деформованих внаслідок дії зусилля в умовах виготовлення дроту, формуються округлі зерна, що свідчить про процеси рекристалізації в матеріалі дроту при його нагріванні в умовах проходження струму (рис. 2б).

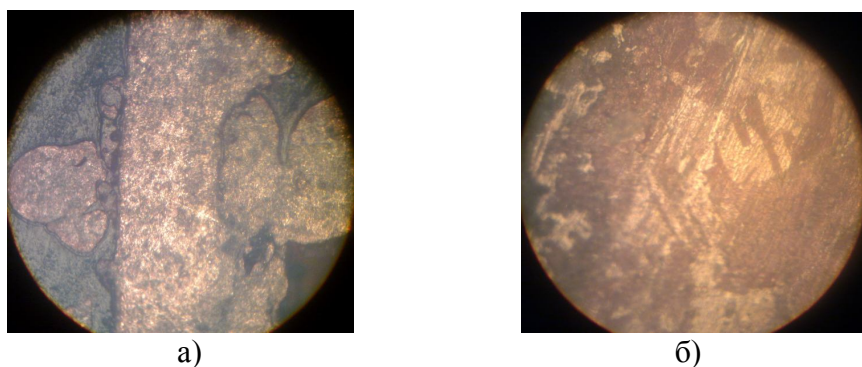
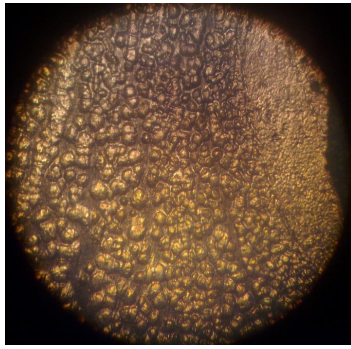


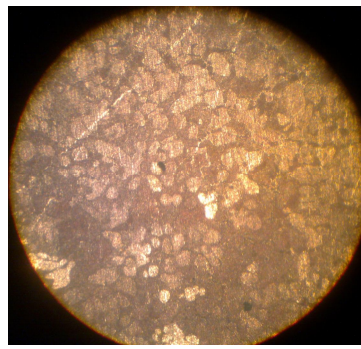
Рис.3. Мікроструктура мідного дроту при короткому замиканні:
а – травник №1 x200; б – травник №2 x500

При проходженні струму короткого замикання, кількість ділянок, які вказують на оплавлення металу, суттєво зростає рис. 3, метричні параметри ділянок оплавлення стають більшими.

При травленні травником №2 на ділянках оплавлення стає помітно, що формується структура, спрямована по осі найшвидшого відведення тепла, тобто формуються дендрити (рис.3б).



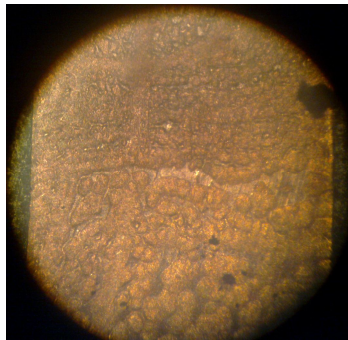
а)



б)

Рис.4. Мікроструктура мідного дроту після пропускання струму $I = 400$ А, протягом 10 с і дії відкритого полум'я $t = 660$ °С протягом 30 хв:
а – травник №1 $\times 200$; б – травник №2 $\times 300$

Дослідження мікроструктури проводів після проходження електричного струму $I=400$ А вказує на те, що в дротах формується крупнозерниста структура, а дія полум'я проявляється в тому, що відбувається окиснення міді на границях зерен, яке зумовлює руйнування матеріалу (рис.4).



а)



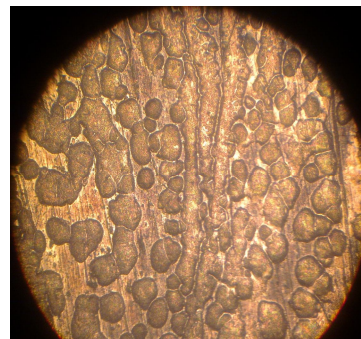
б)

Рис.5. Мікроструктура мідного дроту після пропускання струму $I = 400$ А, протягом 10 с і дії відкритого полум'я $t = 582$ °С протягом 15 хв:
а – травник №1 $\times 200$; б – травник №2 $\times 500$

Дослідження нетривалої дії полум'я це підтверджує, тобто за більш низької температури окиснення міді на границях зерен відбувається меншою мірою (рис.5).



а)



б)

Рис.6. Мікроструктура мідного дроту після дії відкритого полум'я, $t = 582$ °С протягом 15 хв:
а – травник №1 $\times 200$; б – травник №2 $\times 200$

Для дротів, які піддавались нагріванню полум'ям без попереднього пропускання струму, зміна мікроструктури проявляється в окисненні металу тільки з поверхні поверхневого шару (рис.6), тоді як внутрішнього окиснення зерен на границях не спостерігається.

Висновки

1. Матеріал досліджуваного дроту має неоднорідну мікроструктуру, що зумовлене впливом технологічної обробки міді.

2. При пропусканні електричного струму силою 400 А протягом 10 с відбувається як оплавлення, так і рекристалізація матеріалу дроту.

3. Коротке замикання інтенсифікує процеси оплавлення дротів і сприяє формуванню дендритної структури.

4. У дроті, на який спочатку діяли електричним струмом, а потім відкритим полум'ям ($t = 660\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $\Delta t = 30\text{ хв}$), спостерігається перебіг процесів як зовнішнього, так і внутрішнього окиснення та руйнування.

5. При нижчій температурі дія відкритого полум'я зумовлює тільки зовнішнє окиснення, внутрішнє окиснення не відбувається.

6. Для дроту, на який діяли тільки відкритим полум'ям, характерне тільки зовнішнє окиснення матеріалу. Неоднорідність мікроструктури, яка формується внаслідок технологічної обробки металу, зберігається.

Література:

1. <http://www.undicz.mns.gov.ua/content/statistics.html> // Довідка за 2012 рік.

2. **Мальцев М.В.** Металлография промышленных цветных металлов и сплавов (с приложением атласа макро- и микроструктур) / Мальцев М.В. – 2 –е издание, переработанное и дополненное. – М. : «МЕТАЛЛУРГИЯ», 1970. – 343 с.

3. **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. праць. – ЛДУБЖД, 2012, – № 20. – С. 144-149.

4. **Правила** улаштування електроустановок. – Х. : Видавництво «ІНДУСТРІЯ», 2008. – 424 с.

В.І. Гудым, О.Б. Назаровец, О.А. Кузин

ОСОБЕННОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕДНЫХ ПРОВОДОВ НАГРЕТЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ И ОТКРЫТЫМ ПЛАМЕНЕМ

Исследуются изменения в микроструктуре медного провода при действии на него электрического тока и открытого пламени. Рассмотрены свойства и структура проводниковой меди. Проведены эксперименты различных режимов нагрева проводников электрических сетей. На основе металлографических исследований показаны различия в микроструктуре провода в зависимости от режима нагрева и выбранного травителя. Приведены результаты, позволяющие определить причастность электрического тока к возникновению пожара.

Ключевые слова: микроструктура медного провода, электрические сети, металлографические исследования, травитель.

V.I. Hudym, O.B. Nazarovets, O.A. Kuzin

PECULIARITIES OF MICROSTRUCTURE OF COPPER WIRE HEATED BY ELECTRIC CURRENT AND OPEN FLAME

Changes in the microstructure of copper wire under the action of electric current and open flame on it are studied. The properties and structure of the copper wire are examined. Experiments concerning different heating modes of conductors of electrical networks are carried out. Based on metallographic studies differences in the microstructure of the wire depending on the heating mode and selected etching are depicted. These results enable to determine the involvement of electric current to fire ignition.

Key words: microstructure of copper wire, electrical networks, metallographic studies, etching.