УДК 641.8

В.І. Гудим*[1,2]*, *д-р техн. наук, професор,* ***М. Карбонічек*[3]*,*** *д-р техн. наук, професор,* ***О.Б. Назаровець*[1]
*([1]Львівський державний університет безпеки життєдіяльності
[2]Краківська політехніка, [3]Гірничорудна академія, м. Краків)*

АНАЛІЗ МІКРОСТРУКТУРИ МІДНИХ КАБЕЛЬНО-ПРОВІДНИКОВИХ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ, ЯКІ ПЕРЕБУВАЛИ У СЕРЕДОВИЩІ ПОЖЕЖІ

У матеріалах статті розглянуто існуючі методи виявлення причин пожеж від електричних мереж у житловому секторі. Показано їх переваги та недоліки, а також вказані межі їх можливостей. Розглянуто властивості та характеристики електропровідної міді, де показано, що мікроструктура провідників, які не перебували в середовищі високих температур, сильно відрізняється від мікроструктури тих самих провідників після їх нагрівання до високих температур. На основі експериментальних досліджень, виконаних в лабораторіях вітчизняних та зарубіжних закладів, виявлено нові кількісні та якісні показники, які дещо точніше вказують на причетність елементів електромереж до виникнення пожежі.

Ключові слова: електричні мережі, мідні кабельно-провідникові вироби, мікроструктура міді, пожежі

Вступ. Впродовж минулого року в Україні виникло 60790 пожеж, якими завдано збитків на суму понад 2,5 млрд. грн. У вогні загинуло 2863 людини (+1,6 %), серед яких 92 дитини. За 12 місяців минулого року отримали травми 1524 людини. Знищено або пошкоджено 23 тисячі будівель і споруд, 3 381 одиниця транспортних засобів, 14, 7 тисяч тонн кормів.

Майже 78 % усіх пожеж виникали на території житлового сектора, 30,6 % - безпосередньо в оселях громадян;

Основними причинами виникнення пожеж були:

- 62 % – необережність громадян у поводженні з вогнем;
- 18,7 % – порушення правил пожежної безпеки при влаштуванні та експлуатації електроустановок;
- 7,3 % – неправильна експлуатація печей [1].

Як видно зі статистики, друге місце серед причин виникнення пожеж із загибеллю людей займає порушення правил пожежної безпеки при влаштуванні та експлуатації електроустановок.

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. Слід зазначити, що всі причини доцільно розділити на такі, що виникли внаслідок неякісного монтажу електроустановок, низької якості ізоляції елементів електроустановок (дротів, з'єднувальних коробок, вимикачів) та неправильного монтажу, або монтажу з порушеннями вимог та правил. Наступною причиною можуть бути побутові електроприлади (споживачі електричної енергії) такі, як електрочайники, електропраски, електроплити тощо, котрі приєднуються до електромережі. У цьому випадку проводи електромереж можуть бути перевантажені струмом, а загоряння може відбутися в середині приміщення, наприклад папір, тканина абощо від нагрітих елементів електропобутової техніки.

У зв'язку з цим 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.

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 як найточнішу оцінку передпожежної ситуації.

Опис існуючих методів експертизи. За наявності оплавлень на КПВ або на струмопровідних елементах електротехнічних пристроїв, за зовнішнім виглядом потрібно з'ясувати причину їх утворення. При дослідженні причини утворення оплавлень на струмопровідних елементах електромережі, слід встановити природу їх утворення: чи утворилися вони внаслідок дії струмів короткого замикання, чи внаслідок великого перехідного опору в місцях з ослабленим електричним контактом, чи інших проявів електричного струму, або вони утворилися під дією високої температури пожежі. Якщо вони утворилися під дією струмів короткого замикання, то потрібно визначити, в яких умовах навколишнього середовища протікало це коротке замикання, а саме: в умовах, які були перед виникненням пожежі, або в умовах, які характерні для поширення пожежі.

Оплавлення провідників під дією струмів короткого замикання можуть бути локальними з кулеподібною, овальною, краплеподібною формами, з гладкою витягнутою або горбистою поверхнею, а також у вигляді виїмок на поверхні з нерівними напливами. Оплавлення провідників під дією високої температури пожежі відрізняються від оплавлень, утворених під дією струмів короткого замикання. Напливи металу в місцях оплавлень під дією температури пожежі мають більші розміри, і вони розподілені на значну довжину провідника.

Перші спроби визначення причетності аварійних режимів електромережі до виникнення пожежі відносять до 50-х років XX ст. Тоді німецькими вченими [2, 3] за основу для дослідження мідних КПВ було взято їх здатність до активного поглинання кисню повітря при нагріванні з утворенням CuO і Cu_2O. Вважалося що при первинному короткому замиканні ця здатність буде високою оскільки нагрівання буде відбуватись в не задимленому середовищі і навпаки при полум'яному нагріванні коли середовище буде збідненим на кисень ця здатність буде низькою. Таким чином за допомогою металографічного методу можна визначити вміст CuO і Cu_2O в обох випадках.

Згодом російськими вченими після проведення ряду дослідів було встановлено неможливість використання металографічного методу для оцінювання причетності струмів КЗ в електропровідниках з мідними жилами до виникнення пожежі. Оскільки мідь дуже активно взаємодіє з киснем як в чистому, так і в задимленому середовищі і металографічний метод не дає змоги чітко встановити кількісний вміст CuO і Cu_2O.

На основі цих досліджень були видані методичні вказівки [4], в яких використовувався метод рентгеноструктурного аналізу, який в багатьох випадках перевершував металографічний метод. Основним критерієм, який вказує на первинність або вторинність КЗ при дослідженні провідників рентгеноструктурним методом є відмінність в структурі і в ступені окислення окремих ділянок провідників, що пов'язане з різною послідовністю термічних впливів на них відкритого полум'я і струмів КЗ, а також за характером довкілля в момент виникнення КЗ.

Методика призначена для визначення причетності до пожежі КЗ у відкрито прокладених мідних дротах різного перерізу і не залежно від кількості дротинок в жилі, які нагрівалися температурою пожежі не вище 900 °С [5].

Також проводились дослідження науковцями США з метою визначення характерних відмінностей в струмопровідних жилах оплавлених пожежею, струмами перевантаження і КЗ [6]. На підставі отриманих даних можна стверджувати про те, що при зовнішній тепловій дії достатньої інтенсивності може виникнути розплавлення міді по всій довжині; при цьому центральна частина провідника залишиться не розплавленою. Однією з найважливіших ознак яка вказує на дію відкритого полум'я є цілісність дротів в місцях проходження провідників через конструкції, що екранують теплове випромінювання.

Характерними ознаками оплавлення дротів дугою КЗ є локальність оплавлення. Оплавлення можуть мати кулеподібну, овальну, краплеподібну форму з гладкою, витягнутою і нерівною поверхнями.

Крім візуальних спостережень вони приводять деякі результати металографічних досліджень. Плавлення при пожежі залишає на шліфі, виготовленому з мідного дроту, «серцевину не розплавленої міді». При електричному нагріванні утворюється велика кількість газових пустот в металі провідника. Але ці ознаки трапляються не завжди і не мають необхідної відтворюваності.

На сьогоднішній день в Москві [7], розроблений і використовується в практиці метод дефектоскопії проникним випромінюванням.

Під дефектоскопією проникним випромінюванням розуміють метод визначення рентгенівським і γ-випромінюванням внутрішніх дефектів у виробах без їх руйнування. Метод зводиться до виявлення частинок металу які утворилися в процесі КЗ в матеріалі ізоляції дроту.

Виконаний аналіз літератури показав, що існуючі методи та методологія їх застосування в багатьох випадках є неоднозначними.

Опис мікроструктури мідного дроту (теоретичні основи). Мідь у природі існує у вигляді сульфідних руд. В своїй основі відзначається дуже доброю електричною і тепловою провідністю, а також значною пластичністю, але малою міцністю на розтяг, яку можна дещо збільшити холодною пластичною обробкою. Має колір рожево-червоний, температуру плавлення 1083 ˚С. У вологому повітрі мідь вкривається шаром патини, який є основним карбонатом купруму (II) $CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$ та до певної міри запобігає подальшій корозії міді. Середовище, яке містить SO_2 і NH_3, діє на мідь агресивно.

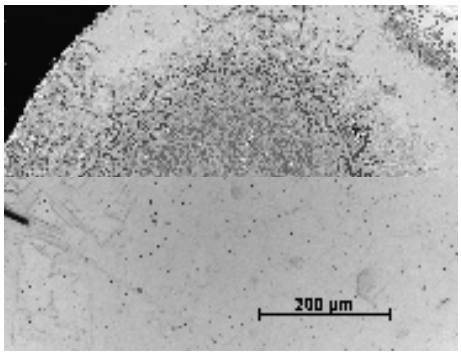
Мідь у промислових масштабах може бути отримана шляхом електролітичного або термічного рафінування. Залежно від способу отримання мідь може містити різну кількість домішків. Металургійна мідь може їх містити 0,5÷1 %, термічно рафінована - 0,1÷0,5 %, а катодна мідь очищена шляхом електролізу - 0,05 % домішок. Домішки у міді, такі як: O, Bi, Pb, S, утворюють тверді розчини включень, які спричиняють крихкість металу. До дуже шкідливих домішок міді відноситься оксиген, який потрапляє у мідь під час плавлення. У міді вона існує у вигляді стійкого до t=380 ^{0}C купрум (II) оксиду CuO, а понад 380 ^{0}C стійким є купрум (I) оксид Cu_2O. Мікроструктура окисненої міді залежить від кількості оксигену. При малому вмісті O (сплав підевтектичний) на витравленому шліфі спостерігаються світлі кристали міді на тлі темнішої евтектики ($Cu+Cu_2O$). При більшому вмісті O сплав може мати структуру евтектичну чи надевтектичну. Під час виплавки міді з відновлювальної атмосфери (напр. світильний газ) – водень дифундує у мідь і реагує з Cu_2O за реакцією:

$$Cu_2O+H \rightarrow 2\,Cu + H_2O$$

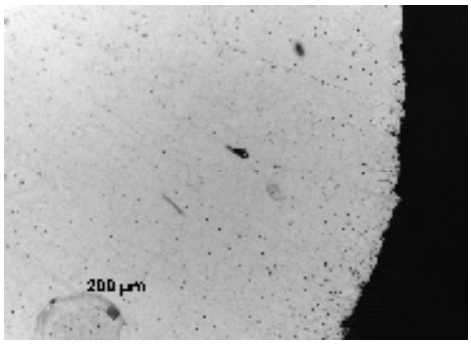
Молекули води, які з'явилися через високу температуру і глибокий вакуум, призводять до зниження пластичності і виникнення мікротріщин (так звана "воднева хвороба" міді). Допустимий вміст оксигену у міді залежить від її сорту і коливається в межах від 0,001 % - для міді пружної, до 0,15 % - для міді ливарної [8].

Мідь, що не містить оксигену, застосовують головним чином в електротехнічній і електронній промисловостях та телекомунікаціях. Малу міцність міді підвищують шляхом додавання до міді 1 % Cd (кадмію) і отримують мідь для трамвайних, тролейбусних і залізничних контактних мереж або сплав міді з 1 % Mg – мідь обмоткова та електричні дроти. Зазвичай в міді, яка використовується для виробництва електричних дротів, вміст оксигену не перевищує 0,02 % - 0,04 %.

Дослідження структури мідного дроту у різних умовах. Для проведення досліджень використовувались нові мідні дроти як з однодротиковою, так і з багатодротиковою жилою, перерізом 2,5 та 4 мм^2. Приклад мікроструктури мідного дроту показано на рис. 1.



а)



б)

Рис. 1. *Мікроструктура мідного дроту з торця (фрагмент краю дроту при збільшенні у 100 разів)*

На рис. 1 видно кристалічні зерна міді з невеликою кількістю домішок і газовими пустотами. Вміст кисню є меншим ніж 0,001%.

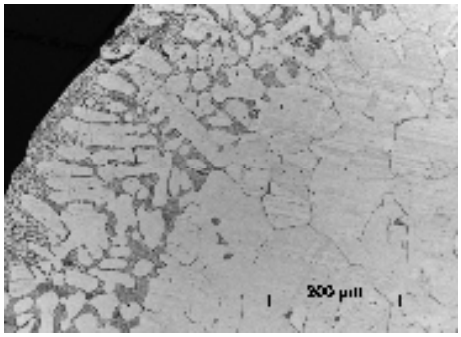


Рис. 2. *Мікроструктура дроту,який перебував в умовах низької температури*

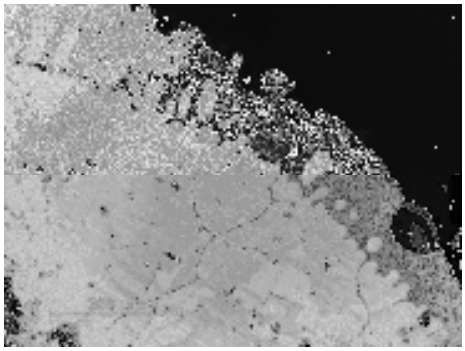


Рис. 3. *Мікроструктура дроту, який перебував в умовах високої температури*

На рис. 2 показано мікроструктуру дроту, який працював в умовах низької температури. На поверхні мідного дроту видно оксид купруму (I). Світлі зерна - це чиста мідь, а темні – евтектика Cu-Cu_2O, тобто мідь, що містить оксиген, який з нею реагує і утворює Cu_2O, що, у свою чергу, утворює з міддю евтектику. Зона біля 200-250 мкм становить суміш ще не окиснених кристаликів міді Cu (світлі ділянки), а також евтектику Cu-Cu_2O. На цій основі важко оцінити температуру, в якій перебував мідний дріт. Можна оціночно встановити, що ця температура була нижчою за 500-600 ^{0}C. Точне визначення температури потребує подальших досліджень глибини проникнення окисненої зони залежно від температури. Цей дріт перебував в пожежі не спричиненій КЗ.

На рис. 3 наведено мікроструктуру дроту після дії на нього високої температури. З рис. 3 видно, що на поверхні дроту міститься евтектика Cu-Cu_2O і ця ділянка є шириною ≈ 100-150 мкм, яка також містить неокиснені кристалики міді (світлі поверхні) у відносно невеликих кількостях. На цій основі можна визначити, що дріт був в середовищі значно вищої температури, але протягом короткого інтервалу часу. Однак важко визначити температуру при якій перебував дріт. Можна наближено встановити, що вона була біля 800-900 ^{0}C, тоді такий дріт перебував в пожежі спричиненій КЗ.

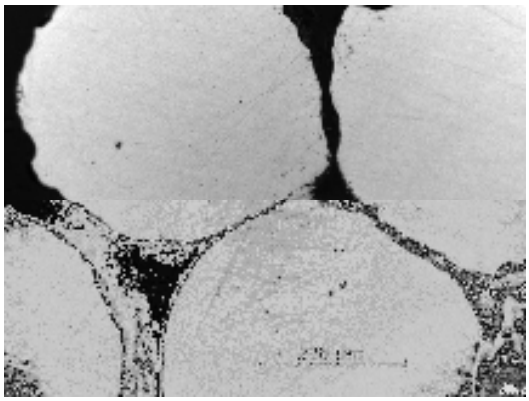


Рис. 4. *Мікроструктура дроту з багатодротикового жилою*

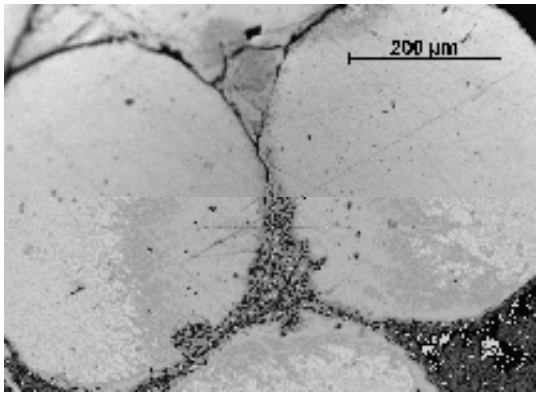


Рис. 5. *Мікроструктура дроту після дії на нього високої температури*

На рис. 4 приведено мікроструктуру дроту з багатодротиковою жилою, без впливу температури. Мікроструктура перерізу дроту вказує неокиснену кристалічну мідь.

На рис. 5 показано мікроструктуру дроту з багатодротиковою жилою після дії на нього високої температури, звідки видно що на поверхні цього дроту є дуже вузька ділянка, яка містить евтектику Cu-Cu_2O, на поверхні кожної дротинки ширина цієї ділянки становить кільканадцять мкм. На цій основі можна припустити, що цей дріт з багатодротиковою жилою перебував у середовищі високої температури, але протягом короткого інтервалу часу, однак і тут важко визначити температуру, в якій перебував дріт. Можна лише наближено встановити, що вона була біля 800-900 ^{0}C, а можливо навіть 1000-1100 ^{0}C. Про це свідчать невеликі оплавлення в місцях дотикання дротинок там де була найвища температура і не достатній доступ кисню повітря. Можна стверджувати, що цей перебував у середовищі пожежі спричиненої КЗ.

Висновоки

1. Аналіз методів показав, що на сьогодні день немає універсальних критеріїв або методів, які б давали можливість на основі експериментальних досліджень робити однозначний висновок причетності нагрівання дротів електричним струмом до виникнення пожежі. У зв'язку з цим багато питань, пов'язаних з пожежною небезпекою режимів електромереж, є невирішеними.

2. Електротехнічна мідь, з якої виготовляються КПВ, містить обмежений вміст оксигену (0,02 %-0,04 %), що можна прийняти за один з критеріїв для визначення їх причетності до виникнення пожежі.

3. Дослідження показали, що за допомогою евтектики Cu-Cu_2O, яка утворюється на поверхні мідного дроту, можна з достатньою для практики точністю розмежовувати КПВ на ті в яких був присутній аварійний режим і ті в яких він був відсутній.

Список літератури:

1. **http://www.ditb.gov.ua/news/155.html //** Довідка за 2011 рік.
2. **Schontag A.** Archiv fur Kriminologie, 115 Bd., Munchen, 1956. – S. 66.
3. **Hagemuer W.** Die metallographische Untersuchung von Kupferleitern als Method zur Unterscheidung zwischen primaren und sekundaren Kurzchlussen // Schriftenreihe der Deutsch Volkspolizei. – 1963. – №7 – 12. – S. 1160-1170.
4. **Методические** указания по определению причастности коротких замыканий в электропроводках с медными жилами к случаям возникновения пожаров на обьектах / [Смелков Г.И., Кашолкин Б. И., Митричев Л. С. Торяник В. В.]. – М. : ВНИИПО МВД СССР, 1974. – 33 с.
5. **Смелков Г. И.** Пожарная безопасность электропроводок : [монография] / Смелков Г. И. – М. : КАБЕЛЬ пром, 2009. – 328 с.

6. Ettling B.V. Electrical wiring in Builing Fires // Fire Technology. – 1978. – 14, №4. – P. 317-325.

7. http://www.kabel-news.ru/netcat_files/90/100/november_09_sposob_diagnostirovaniya.pdf

8. Металознавство: Підручник / О.М. Бялік, В.С. Черненко, В.М. Писаренко, Ю. Н. Москаленко. – 2 –ге вид., перероб. І доп. – К.: ІВЦ "Видавництво «Політехніка»", 2002. – 384 с.

В.И. Гудым, М. Карбоничек, О.Б. Назаровець

АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕДНЫХ КАБЕЛЬНО-ПРОВОДНИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ, КОТОРЫЕ НАХОДИЛИСЬ В СРЕДЕ ПОЖАРА

В материалах статьи рассмотрены существующие методы выявления причин пожаров от электрических сетей в жилищном секторе. Показаны их преимущества и недостатки, а также указаны пределы их возможностей. Рассмотрены свойства и характеристики электропроводной меди, где показано, что микроструктура проводников, которые не находились в среде высоких температур сильно отличается от микроструктуры тех же проводников после их нагревания к высоким температурам. На основе экспериментальных исследований, выполненных в лабораториях отечественных и зарубежных заведений, обнаружены новые количественные и качественные показатели, которые несколько точнее указывают на причастность элементов электросетей к возникновению пожара.

Ключевые слова: электрические сети, медные кабельно-проводниковые изделия, микроструктура меди, пожары

V.I. Hudym, M. Karbonichek, O.B. Nazarovets

ANALYSIS OF MICROSTRUCTURE OF COPPER CABLE-CONDUCTOR WARES OF ELECTRIC NETWORKS WHICH WERE IN FIRE ENVIRONMENT

The article considers existent methods of exposure of causes of fire from electric networks in residential sector. Their advantages and drawbacks are outlined, and also the limits of their possibilities are indicated. Properties and characteristics of electroconductive copper are considered. It is shoved that microstructure of conductors which were not in the environment of high temperatures strongly differs from the microstructure of the ones after exposure to high temperatures. On the basis of experimental researches executed in the laboratories of local and foreign establishments new quantitative and qualitative indexes were found which more precisely specify on involvement of elements of the electric systems in the origin of fire.

Key words: electric networks, copper cable- conductor wares, microstructure of copper, fires

❖ ❖ ❖