

УДК 343.983.2

О. Ф. Федулова, старший судовий експерт*Державного науково-дослідного експертно-криміналістичного центру МВС України*

ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЕРТНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ОПЛАВЛЕНЬ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ НА ПРОВІДНИКАХ, ЩО ЗАЗНАЛИ ТРИВАЛОГО ВІДПАЛУ В УМОВАХ ПОЖЕЖІ

Розглянуто вплив короткого замикання і струмового перевантаження різної кратності на пошкодження мідного провідника. Проведено металографічний аналіз оплавлених ділянок мідних жил, що утворилися внаслідок протікання по провіднику надструму. Виявлено і узагальнено структурні ознаки, що формуються в оплавленнях мідного провідника при струмовому перевантаженні і короткому замиканні після відпалу.

Ключові слова: металографічний аналіз, коротке замикання, відпал, судова пожежно-технічна експертиза, струмове перевантаження, надструм, оплавлення, мідь, електропроводка.

Рассмотрено влияние короткого замыкания и токовой перегрузки различной кратности на повреждения медного проводника. Проведен металлографический анализ оплавленных участков медных жил, образующихся в результате протекания по проводнику сверхтока. Выявлены и обобщены структурные признаки, формирующиеся в оплавлениях медного проводника при токовой перегрузке и коротком замыкании после отжига.

The influence of short circuit and process overcurrent different multiplicity damage the copper conductor. An analysis of metallographic sections of melted copper wires, resulting from over-current flow through the conductor. Identified and described the features formed in the structure of melting copper conductor with current overload and short circuit after annealing process.

У сучасних умовах науково-технічного прогресу постійно з'являються нові прилади великої потужності, постійно збільшується їх кількість. Відповідно, збільшується питоме споживання електроенергії, що призводить до прихованого розвитку аварійного режиму роботи електромережі у вигляді струмових перевантажень, що, у свою чергу, може спричинити виникнення пожежі.

Розслідування злочинів, пов'язаних з пожежами, значною мірою утруднені у зв'язку зі специфікою самого явища пожежі, що містить у собі небезпеку знищення слідової інформації про обставини її виникнення і розвитку. Під час дослідження переважної більшості пожеж виникає версія про причетність до виникнення горіння аварійних режимів в електрообладнанні. Аналіз цієї версії майже завжди пов'язаний з дослідженням електрообладнання й електричної проводки.

У різні частини окремі питання цього напрямку досліджували А. І. Колмаков, Л. С. Митрічев, А. Ю. Мокряк, В. П. Підгайний, О. Р. Росинська, Б. В. Степанов, Г. І. Смелков, З. І. Твер'янович, І. Д. Чешко та інші. Проте, як свідчить аналіз, питанню впливу відпалу на структуру оплавлень короткого замикання (далі — КЗ), за якою й визначають його тип, в існуючій літературі приділено недостатньо уваги. Це призводить до певних труднощів і навіть помилок під час оцінки цієї структури, а може призвести й до неправильного загального висновку стосовно причинно-наслідкового зв'язку між пожежею та КЗ.

Метою цієї статті є висвітлення особливостей дослідження оплавлень КЗ на провідниках, що зазнали тривалого відпалу в умовах пожежі.

Електричні провідники — основна складова електромережі. Вони є унікальними носіями слідової інформації як об'єкти експертних досліджень, мета яких — встановлення причин й обставин виникнення та розповсюдження пожежі. Це, зокрема, зумовлено порівняно високою температурою плавлення металу провідників (для найбільш вживаних алюмінієвих і мідних провідників вона становить близько 660°C і 1100°C відповідно, для сталевих — понад 1500°C) [1]. Тобто за температурних умов, за яких вироби з деревини, полімерів та інших розповсюджених легкозаймистих матеріалів знищуються, провідники як більш термостійкі меншою мірою піддаються руйнівному впливу пожежі. При цьому електропровідники, на відміну від інших виробів господарського і спеціального призначення, є обов'язковими складовими оснащення будинків, об'єктів і споруд, а також обов'язково присутні в розповсюджених електротехнічних пристроях і апаратурі.

У спеціальній літературі [2; 3; 4; 5; 6] автори виокремлюють такі основні пожежонебезпечні аварійні режими в електромережах і установках:

- повне (металічне) КЗ;
- неповне КЗ;
- перевантаження електромережі;
- великий перехідний опір;
- вихрові токи;
- іскріння.

Під час струмового перевантаження (аварійного пожежонебезпечного режиму, за якого елементом електричного ланцюга проходить струм, що перевищує номінальне значення, на яке розрахований цей елемент) елементи електричного ланцюга, зокрема провідники, перегріваються і можуть пошкодитись. При цьому ступінь їх пошкодження залежить від кратності струму перевантаження, що дорівнює відношенню величини робочого струму до номінального або допустимого за тривалістю [7]. Так, у разі значних перевантажень упродовж короткого часу може і не виникнути помітних термічних ушкоджень, водночас тривалий нагрів провідника до температур понад 65°C призводить до втрати його еластичності, подекуди тріщинуватості його ізоляційного покриття, а отже, уможливорює виникнення, у тому числі, режиму затяжного КЗ, за якого сила струму здатна перевищувати робочі значення у сотні разів. Це, у свою чергу, може призвести до виникнення осередків займання.

При цьому має місце й зворотний причинно-наслідковий зв'язок, коли в умовах зовнішнього термічного впливу пожежі порушується цілісність ізоляції провідників, результатом чого стає утворення оплавлень короткого замикання.

На сьогодні найбільш дослідженим (з експертно-криміналістичної точки зору) пожежонебезпечним режимом є саме КЗ.

Установлення прямого або зворотного причинно-наслідкового зв'язку між пожежею та КЗ на електричних провідниках можливе завдяки тому, що метал провідників здатен зберігати ситуаційну слідову інформацію в мікроструктурі, яка фіксує параметри стану металу як у процесі його затвердіння, так і після цього разом зі змінами фізико-хімічних (у першу чергу температурних) умов навколишнього середовища.

До того ж уявлення експерта, який досліджує КЗ на провідниках, про первісний стан і специфічні характеристики загалом стандартизованого металу цих провідників значною мірою сприяють ідентифікації зазначених вище ознак і слідів.

Зокрема, відомо, що мідні дроти для провідників виготовляють на машині грубого волочіння з грубих заготовок — мідної катанки, яку, у свою чергу, отримують методом безперервного лиття і прокатки з мідних катодів [8]. Процес волочіння являє собою холодну обробку металу тиском, за якої заготовка проходить через волочильний інструмент (волоку) і набуває форми і розмірів його внутрішнього каналу. У процесі волочіння відбувається так звана нагартівка, що погіршує електропровідність дроту. Також під час волочіння змінюються пластичні властивості металу: він зміцнюється (наклепується); змінюється і його структура: зерна металу подрібнюються у напрямку волочіння, тобто утворюється текстура. Зняття «наклепу» і повернення металу первісних властивостей досягається шляхом відпалу — нагріву металу до певної температури, витримання упродовж певного часу й охолодження. У результаті цього метал знову стає пластичним, до того ж утворюється так звана двійникова структура (ділянки з набором зерен зі спільними паралельними межами в структурі металу провідника).

Сьогодні експерти мають у своєму розпорядженні низку методичних посібників для проведення комплексних металознавчих і пожежно-технічних досліджень щодо встановлення причин виникнення пожеж [2; 3; 9; 10; 11]. У них описано інструментальні методи встановлення моменту виникнення КЗ на мідних і алюмінієвих провідниках, що дозволяє диференціювати дугові оплавлення, які виникають у результаті так званих первинних і вторинних КЗ (тобто тих, що ініціювали пожежу, і тих, що стали її наслідком). У процесі використання ці методики було доповнено результатами експериментальних досліджень Київського науково-дослідного інституту судових експертиз [12].

Експертами ДНДЕКЦ було розроблено узагальнену практичну методику металознавчого дослідження електричних провідників з ознаками КЗ, яка на підставі структурних ознак дозволяє реставрувати умови, за яких виникло КЗ, що сприяє встановленню причетності струмових перевантажень до виникнення певної пожежі [13].

Відповідно до зазначених методик і методичних рекомендацій основоположною ознакою, яка є вирішальним чинником для експерта під час визначення ним температурних умов навколишнього середовища, у яких відбулося досліджуване оплавлення КЗ, і встановлення відповідності цього КЗ конкретному типу, є мікроструктура металу досліджуваного оплавлення. Зокрема, наявність дрібних, витягнутих у бік зони тепловідводу зерен свідчить про прискорене, направлене (у бік холодного провідника або нерозжареного навколишнього середовища) затвердіння

металу оплавлення КЗ, а отже, за винятком рідкісних випадків наявності специфічних умов локалізованого тепловідводу в умовах розжареного середовища пожежі, про наявність достатнього градієнту температур між розплавленим КЗ металом провідника і контактуючим з ним оточенням, що загалом відповідає первинному КЗ. Водночас структура, що складається з рівновісних укрупнених зерен, відповідає тривалому затвердінню в умовах відсутності пріоритетного направлення (коли температура розплавленого КЗ металу є порівнянню з температурними складовими неоплавленої ділянки провідника і навколишнього середовища, що апіорі свідчить про розжарене середовище, у якому виникло замикання), а отже, відповідає вторинному КЗ.

Критеріями відбору провідників з ознаками КЗ для проведення діагностичного металографічного аналізу є основні морфологічні показники величини і тривалості зовнішнього термічного впливу на ці провідники в умовах пожежі [2; 11], а саме: спікання і сплавлення дротинки у жилі, зміна перерізу дроту по його довжині, набуття крихкості, коли провідник після двох-чотирьох згинів ламається. Наведені чинники свідчать про ступінь перепалу металу оплавлення КЗ, що може призвести до зміни як структурних, так і морфологічних його характеристик у вигляді повної або часткової втрати металевих властивостей.

Оскільки у вилучених з місця пожежі багатодротових провідниках спікання дротинки певною мірою наявне майже завжди і при цьому при збереженні виражених пластичних властивостей металу здебільшого зберігаються також його первісні структурні ознаки, експерти під час відбору зразків для металографічного аналізу обмежуються переважно саме показниками пластичності провідників з ознаками КЗ (їх стійкості до деформації згину).

Водночас, як свідчить експертна практика, мідні дроти електротехнічного призначення, а особливо ті з них, що мають порівняно великі перерізи, часто-густо мають і достатньо високі показники пластичності навіть після значних перепалів, що призводять до структурних видозмін металу (рекристалізації) або навіть до знищення його структури.

На структурному рівні рекристалізація починається з появи зародків на межах деформованих зерен [14; 15; 16]. У подальшому зародки ростуть за рахунок деформованих зерен, через що утворюються нові зерна аж до повного зникнення деформованої структури.

Під температурою рекристалізації розуміють температуру, при якій у металах, що піддавалися деформації в холодному стані, починається утворення нових зерен.

Згідно зі встановленою А. А. Бочваром залежністю між температурою порогу кристалізації і температурою плавлення для чистих металів і великого ступеня деформації (правило Бочвара):

$$T_{\text{рекр}} = 0,4 T_{\text{пл}},$$

де: $T_{\text{рекр}}$ — температура рекристалізації в абсолютних градусах;
 $T_{\text{пл}}$ — температура плавлення в абсолютних градусах.

У зв'язку з тим, що при температурі рекристалізації (для міді це близько 270 °C) процес утворення нових зерен відбувається дуже повільно, практично холодноте-

формовані метали і сплави нагрівають до більш високої температури, наприклад, мідь до 450—500 °С. Ця температура і є температурою рекристалізаційного відпалу. Залежно від ступеня деформації величина зерна після рекристалізації може бути різною, у тому числі можуть утворюватися зерна дуже великих розмірів.

Загалом рекристалізація є одним з видів термічної обробки металів і сплавів, що призводить до структурної оптимізації і зменшення вільної енергії матеріалу в межах певної фази. Процес рекристалізації відбувається за рахунок руху і зникнення меж з великими кутами розорієнтування. Швидкість рекристалізації зростає з підвищенням температури по експоненті.

Розрізняють три стадії рекристалізації: первинна, збиральна і вторинна.

Первинна рекристалізація супроводжується утворенням нових неспотворених кристалітів у деформованому матеріалі. Зародки рекристалізації формуються, як правило, під час збільшення розміру субзерен, яке відбувається за рахунок навколишньої деформованої матриці. При первинній рекристалізації відбувається відновлення структури і властивостей недеформованого матеріалу.

Збиральна рекристалізація супроводжується збільшенням середньої величини зерна шляхом їх зростання за рахунок один одного. Основною рушійною силою збиральної рекристалізації є прагнення до зменшення енергії меж зерен за рахунок зменшення їх протяжності.

При вторинній рекристалізації лише окремі зерна виявляються спроможними зростати зі значно більшою швидкістю, ніж інші, тобто відігравати роль вторинних центрів (при збиральній рекристалізації таких центрів немає). Вторинна рекристалізація характеризується структурою, що складається з різних за розміром зерен (різностерністістю).

Групою дослідників Федеральної державної бюджетної установи «Всеросійський науково-дослідний інститут протипожежної оборони» МНС, які отримали та опублікували результати морфологічного і металографічного аналізу оплавлених мідних провідників, що їх піддавали струмовому перевантаженню різної кратності, було також проаналізовано вплив високих температур на мідні провідники, оплавлені внаслідок струмового перевантаження і КЗ [7; 17].

Відпал оплавлених мідних провідників, отриманих у результаті моделювання аварійних процесів, проводили в муфельній печі за таких умов:

- температура нагріву — 700 °С, 800 °С, 900 °С, 1000 °С;
- швидкість нагріву — 10 град/хв.;
- час витримки зразків — 20 хв. і 40 хв.;
- охолодження до кімнатної температури — у муфельній печі при відкритих дверцятах.

Зазначені умови загалом відповідають температурному режиму відпалу оплавлених КЗ в умовах пожежі.

Металографічний аналіз оплавлених після відпалу проводився звичайним способом [7; 11; 13]. Кількість кисню в міді визначали з використанням еталонів мікроструктур. У подальшому проводився аналіз найбільш значущих параметрів мікроструктури: вміст кисню, форма і розмір зерен, оплавлених меж зерен, пористість і видимість меж між провідником і оплавленням з погляду визначення природи оплавлених.

Загалом вплив відпалу на мікроструктуру оплавлених, спричинених струмовим перевантаженням, такий. Відомо, що на вміст кисню в оплавленні впливає крат-

ність надструму і для таких оплавлень характерний доевтектичний і евтектичний стан міді (тобто вміст кисню перебуває в межах 0,05—0,39 %). При 8-разовому перевантаженні концентрація кисню в зоні оплавлення становить 0,20—0,39 %, при 12-разовому перевантаженні — 0,05—0,15 %.

Під час проведеного дослідження було встановлено, що відпал оплавлень, спричинених 8- і 12-разовим перевантаженням, до певних температур призводить до зменшення в них вмісту кисню. При цьому при температурному впливі 700—750 °C помітних змін цього параметра не було. Водночас нагрів до 800 °C супроводжується незначним зменшенням вмісту кисню в оплавленні. Подальше збільшення температури до 900 °C призводить до зменшення вмісту кисню до 0,05—0,10 %. При температурі відпалу 1000 °C упродовж 20 хв. і 40 хв. концентрація кисню в оплавленні становить 0,05 %.

Як відомо зі спеціальної літератури [7; 11; 13], протікання по провіднику надструму, що перевищує номінальне значення, спричиняє в оплавленій ділянці утворення зерен міді різної форми та орієнтації до поверхні оплавлення. У процесі дослідження спостерігали зерна дендритної, стовпчастої і рівновісної форми.

Відпал при температурах 800—900 °C упродовж 20 хв. і 40 хв. не спричиняє появу виражених дендритних зерен, спостерігається лише укрупнення рівновісних зерен міді з появою двійників відпалу всередині. Підвищення температурного впливу до 1000 °C супроводжується зникненням дендритної структури з нівелюванням їх переважної орієнтації і значним укрупненням рівновісних зерен міді аж до розмірів, наближених до перерізу провідника.

Оплавлення, що утворюються при протіканні по провіднику надструму, мають чітку межу переходу до неоплавленої частини проводу. Цю межу спостерігають під час металографічних досліджень. Експерименти з відпалом таких оплавлень засвідчили, що ця межа зберігається при відпалі до 800—900 °C, а в окремих випадках — і при відпалі у 1000 °C. Проте високотемпературний відпал при температурі 1000 °C зазвичай нівелює цю межу.

У межах оплавлень наявні пори різних розмірів, у деяких випадках порівнянні з діаметром оплавлення. Будь-якого впливу температури і часу відпалу на пористість не виявлено.

Характеризуючи вплив відпалу на мікроструктуру оплавлень, спричинених КЗ, доцільно зазначити таке. Оплавлення, що утворюються при електродуговому процесі КЗ, під час металографічного дослідження, як правило, мають структуру швидкої кристалізації, а саме сильно витягнуті зерна, орієнтовані вздовж осі провідника. Концентрація кисню при цьому в зоні оплавлення не перевищує 0,05 %.

Відпал оплавлень, спричинених електродуговим процесом, при температурі 700—800 °C суттєвих змін у форму зерна не вносить, а при температурі 900 °C призводить до формування зерен рівновісної форми з проявленням при цьому двійників відпалу. Збільшення температури до 1000 °C спричиняє оплавлення меж зерен по всьому об'єму оплавлення КЗ. Відомо також, що електродуговий процес за рахунок локальності дії сприяє формуванню між оплавленням і провідником чітко видимої межі. При відпалі понад 900 °C цю межу не спостерігають.

На підставі проведених експериментальних досліджень встановлено, що відпал оплавлень мідних провідників, спричинених надструмами і електродуговими

процесами КЗ, за певних температур впливає на мікроструктуру і, відповідно, на збереження ознак природи цих процесів.

Нижче наведено приклади з експертної практики ДНДЕКЦ МВС України щодо дослідження мідних провідників з ознаками КЗ, вилучених з місця пожежі (пожежа відбувалася в будинку).

За результатами дослідження встановлено, що структура металу оплавлення КЗ провідника № 1 свідчить про утворення і рівномірний розподіл інтерметалідів різного розміру в металі (рис. 1), що є ознакою відпалу металу [16].



Рис. 1. Рівномірний розподіл інтерметалідів різного розміру в металі оплавлення КЗ провідника № 1 до травлення (x200)

Дрібнозерниста структура, що складається з новоутворених кристалітів по межах розподілених інтерметалідів, відповідає первинній рекристалізації металу (рис. 2). Структурні ознаки природи КЗ, що спричинило це оплавлення, знищено в умовах температурного впливу пожежі.



Рис. 2. Структура первинної рекристалізації металу оплавлення КЗ провідника № 1 (дислокація новоутворених кристалітів по межах розподілених інтерметалідів, x200)

Структура металу оплавлення КЗ провідника № 2 складається з укрупнених рівновісних зерен, близьких за розмірами до перерізу провідника. Зазначена структура наявна як на оплавленій КЗ ділянці (рис. 3), так і в прилеглій до неї неоплавленій зоні провідника (рис. 4). Межа між оплавленням і провідником нівельована. Укруп-

нені співрозмірні зерна структури відповідають другій стадії рекристалізації — збиральній. Первинні структурні ознаки природи КЗ, що спричинило це оплавлення, знищено внаслідок рекристалізаційних процесів.

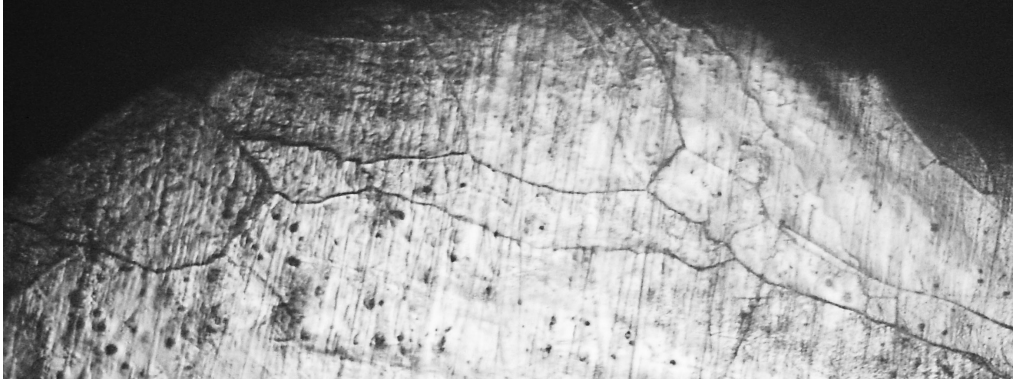


Рис. 3. Крупнозерниста рекристалізована структура зони оплавлення КЗ провідника № 2 (x200)

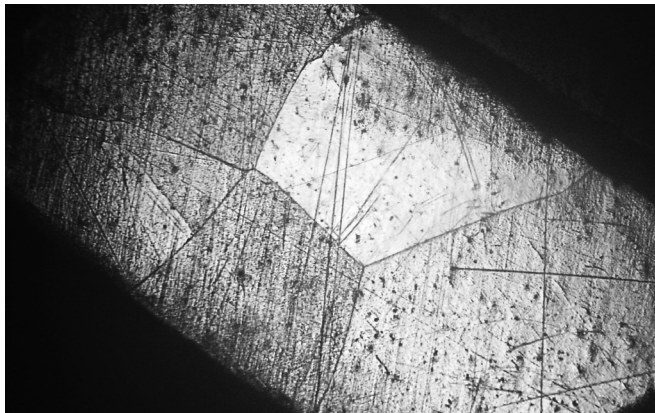


Рис. 4. Крупнозерниста рекристалізована структура провідника поза зоною КЗ провідника № 2 (x200)

Структура металу оплавленої КЗ і неоплавленої ділянок провідника № 3 складається зі сформованих внаслідок високотемпературної (близько 900 °C) рекристалізації зерен рівновісної форми з двійниками відпалу всередині (рис. 5).

З огляду на те, що в жодному з відомих випадків відпалу рекристалізація не призвела до утворення дендритів, а лише до утворення рівновісних, переважно укрупнених зерен, то перестраховуватися з приводу небезпеки видозмін в умовах пожежі первинних ознак природи КЗ слід лише при виявленні на досліджуваних оплавленнях саме рівновісної структури, особливо у випадках її різнозернистості або укрупнених зерен.

У цих випадках під час металографічного дослідження провідників з ознаками КЗ саме наявність зони структурного переходу металу провідника від вихідної двійникової до новоутвореної дугою КЗ є показовою при оцінці структури оплавлення на придатність до встановлення по ній природи (типу) КЗ.



а)



б)

Рис. 5. Зерна рівновісної форми з двійниками відпалу в структурі металу оплавлення КЗ (а) та на ділянці поза зоною КЗ (б) провідника № 3 (х200)

Підсумовуючи, слід звернути увагу на небезпеку прийняття рівновісної крупнозернистої беззвтектичної структури оплавлень КЗ після відпалу і рекристалізації в умовах пожежі за вихідну (утворену безпосередньо після оплавлення КЗ) рівновісну структуру, що характеризує застигання оплавлення в безкисневому високотемпературному середовищі.

Наведені у статті відомості можуть використовуватися під час проведення експертиз у справах про пожежі та електротехнічних експертиз, у тому числі з метою уникнення помилкової оцінки структурних особливостей металу оплавлень КЗ провідників.

Список використаної літератури

1. Болховитинов Н. Ф. Металловедение и термическая обработка / Н. Ф. Болховитинов. — М. : Машгиз, 1961. — 462 с.
2. Смелков Г. И. — Методы определения причастности к пожарам аварийных режимов в электротехнических устройствах / Смелков Г. И., Александров А. А., Пехотиков В. А. — М. : Стройиздат, 1980. — 58 с.
3. Влияние нагрева электрическим током и внешнего нагрева на структуру алюминиевого провода / [Россинская Е. Р., Степанов Б. В., Сандлер В. С. и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1990. — № 8. — С. 61—63.
4. Чешко И. Д. Экспертиза пожаров (объекты, методы, методики исследования) / И. Д. Чешко. — СПб. : СПб ИПБ МВД России, 1997. — 560 с.
5. Чешко И. Д. Технические основы расследования пожаров : метод. пособ. / И. Д. Чешко. — М. : ВНИИПО, 2002.
6. Смелков Г. И. Пожарная безопасность электропроводок / Г. И. Смелков. — М. : ООО «Кабель», 2009. — 328 с.
7. Мокряк А. Ю. Металлографический анализ медных проводников, подвергшихся воздействию токовой перегрузки при экспертизе пожаров / А. Ю. Мокряк, И. Д. Чешко // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. — 2014. — № 4. — С. 51—58.
8. Хаяк Г. С. Волочение проволоки из цветных металлов и сплавов / Г. С. Хаяк. — М. : Металлургия, 1967. — 151 с.
9. Колмаков А. И. Диагностика причин разрушения металлических проводников, изъятых с мест пожаров : метод. реком. / Колмаков А. И., Степанов Б. В., Зернов С. И. — М. : ЭКЦ МВД РФ, 1992. — 32 с.

10. Смелков Г. И. Пожарная опасность электропроводок при аварийных режимах / Г. И. Смелков. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 184 с.
11. Исследование медных и алюминиевых проводников в зонах короткого замыкания и термического воздействия : метод. реком. / [Митричев Л. С., Колмаков А. И., Степанов Б. В. и др.]. — М. : ВНИИ МВД СССР, 1986. — 44 с.
12. Підгайний В. П. Розробка методичних рекомендацій дослідження слідів коротких замикань з метою встановлення їх причетності до пожежі : звіт / В. П. Підгайний. — К., 2002.
13. Буханченко О. А. Методика дослідження електричних провідників з ознаками короткого замикання / Буханченко О. А., Гуралюк І. В., Запорожець Є. В. — К. : ДНДЕКЦ МВС України, 2014. — 111 с. : іл.
14. Бочвар А. А. Основы термической обработки сплавов / А. А. Бочвар. — М. : Металлургиздат, 1940. — 139 с.
15. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов : учеб. / И. И. Новиков. — М. : Металлургия, 1978. — 480 с.
16. Горелик С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов / Горелик С. С., Добаткин С. В., Капуткина Л. М. — М. : МИСИС, 2005. — 432 с.
17. Мокряк А. Ю. Влияние отжига на микроструктуру оплавленных медных проводников, вызванных сверхтоком / А. Ю. Мокряк, А. В. Мокряк // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. — 2014. — № 1 (5). — Т. 2. — С. 241—245.