

УДК 621.762

Хоменко О. І.
Хоменко О. В.
Баглюк Г. А

ОЦІНКА ЯКОСТІ МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ, ОТРИМАНІХ ГАРЯЧИМ ШТАМПУВАННЯМ, ЗА ЇХНЬОЮ МІКРОСТРУКТУРОЮ

Відомо, що до матеріалів електричних дугогасійних контактів, що призначені для вакуумних вимикачів у мережах середніх та високих напруг (10–36 кВ) і великих струмів (20–100 кА), ставляться вимоги щодо механічної міцності, електричної провідності, здатності до розсіювання тепла, перешкоджання злиттю катодних плям та встановленню стаціонарної електричної дуги в процесі дугогасіння [1]. Цим вимогам відповідають переважно композиційні матеріали металоматричного типу, де в ролі електропровідної матриці використовують мідь, а в якості зміцнюючої компоненти – тверді тугоплавкі метали – хром, вольфрам, молібден тощо. Зрозуміло, що задовольнити висунуті вимоги може тільки матеріал певного складу з певною мікроструктурою, яка, в свою чергу, залежить від технології отримання. Аналітичних виразів для оптимізації мікроструктури і, тим більше, прив'язки її до певних технологій наразі немає. Потрібну структуру знаходять копінтим шляхом стендових та натурних випробувань готових контактів у складі вакуумних камер.

В процесі досліджень одного з подібних матеріалів системи Cr50% мас.–Cu, було встановлено, що матеріал, отриманий за технологією гарячого штампування має певні переваги перед матеріалом того ж складу, отриманого традиційним для порошкової металургії методом – попереднім пресуванням для надання технологічної міцності та подальшим спіканням у присутності рідкої фази (далі будемо посилались на цей метод як на рідкофазне спікання) [2]. Але кількісна металографія зображень мікроструктури цих матеріалів не виявила переконливих причин для існування таких переваг. Дійсно, менший розмір часток міцної фази давав деяку підставу очікувати більшу механічну міцність, але ніяк не пояснював кращу електричну провідність. Навіть більше: матеріали, отримані методом гарячого штампування, при практично одному і тому ж середньому розмірі часток міцної фази (13–14 мкм) мали помітну різницю у фізичних властивостях при різних способах попереднього компактування.

Розподіл частинок міцної фази за розміром не пояснював різниці у властивостях, бо у переважній більшості матеріалів, залучених для дослідження, він мав характер, близький до логнормального закону. Розподіл частинок за коефіцієнтом форми Салтикова [3] показав, що у мікроструктурах усіх досліджуваних матеріалів переважають частинки, наближені до поліедричних та сферичних.

Нагальним стало питання більш детальної оцінки якості мікроструктури, ніж дає кількісна металографія.

Виникло припущення, що на фізичні властивості, зокрема на механічну міцність досліджуваних матеріалів, впливає не стільки характер розподілу частинок міцної фази за розміром, скільки їхня спроможність створити регулярний каркас. Такий каркас не тільки позитивно впливав би на механічну міцність, але зумовив би також гарантований шлях електричному струмові по матриці з високою електричною провідністю, тобто забезпечив би більш високу питому електричну провідність матеріалу.

Для оцінки ступеня наближення мікроструктури до регулярної для електричних дугогасійних контактів був запропонований показник, що ґрунтується на геометричних характеристиках, отриманих шляхом кількісної металографії. При цьому реальну мікроструктуру матеріалу порівнюють з ідеалізованою, де сферичні частинки міцної фази з радіусом r , що дорівнює половині середнього діаметра Фере (середнє значення проєкцій довжини об'єкта на похилі осі) відповідних частинок реальної структури, розташовані регулярно на відстані a одна від одної, що дорівнює мінімальній міжцентровій відстані частинок реальної структури (рис. 1).

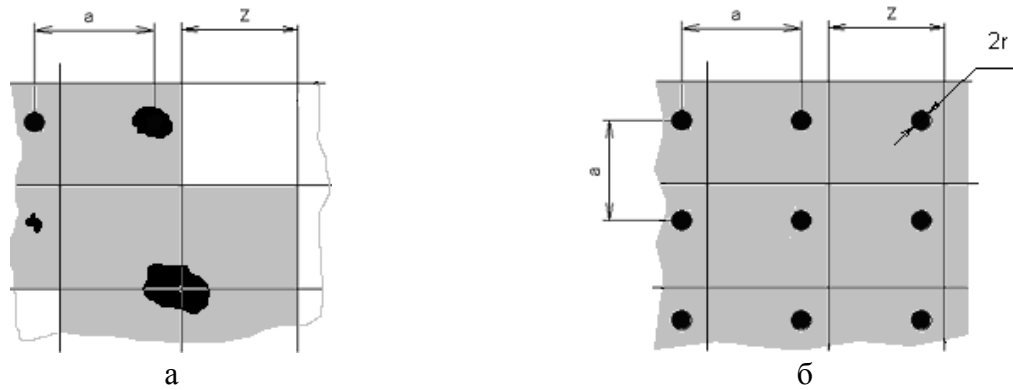


Рис. 1. Розрахунок показника наближення реальної структури (а) до ідеалізованої регулярної (б)

Кількісне значення показника наближення структури до регулярної (або коротко – показника регулярності) розраховують наступним чином. Зображення мікроструктури накладають умовною ортогональною сіткою з розміром комірки $z = a$. Якщо в комірку попадає бодай одна частинка міцної фази, комірку умовно зафарбовують, скажімо, у чорний колір, якщо ні – залишають незафарбованою, скажімо, білою. Під попаданням частинки в комірку розуміють розташування бодай однієї точки проекції зображення частинки всередині комірки. Знаходять відношення кількості зафарбованих комірок до кількості усіх комірок у полі зору, тобто

$$K_p = \frac{N_{\text{ч}}}{N_{\text{ч}} + N_{\text{б}}}, \quad (1)$$

де $N_{\text{ч}}$ – кількість комірок, зафарбованих чорним, $N_{\text{б}}$ – кількість комірок, що залишились білими.

Такий спосіб розрахунку значення показника є дуже схожим на метод розрахунку розмірності Мінковського «box counting» [4], але згущення сітки та обчислення границі математичного виразу у цьому випадку не виконують, через що обчислення за формулою (1) виконуються просто і швидко.

Як бачимо, фізичним сенсом показника наближення структури до регулярної є частота (гранично – ймовірність) попадання частинки реальної структури у той простір, де мала б знаходитись частинка ідеалізованої регулярної структури [5]. Зрозуміло, що при накривті зображення ідеалізованої регулярної структури сіткою зі вказаним розміром комірки, в кожному з них попаде бодай одна частинка при будь-якому розташуванні початкового вузла сітки, тобто значення показника дорівнюватиме одиниці. Чим менше від одиниці це значення, тим більше реальна структура відрізняється від регулярної.

Звісна річ, можна розглядати ще й інші ідеалізовані регулярні структури, як це зроблено в [5], але практика показала, що для кожної з еталонних регулярних структур у більшості випадків значення показника регулярності відрізняється мало або не відрізняється зовсім, тому обмежимося розглянутим випадком.

Запропонований показник має суттєву ваду, бо не приймає до уваги розмір частинок реальної структури і, строго кажучи, є справедливим тільки для рівномірного розподілу їхніх розмірів. Якщо нормувати показник (1) до середнього розміру частинок міцної фази наступним чином

$$K_H = K_p \frac{2r}{z}, \quad (2)$$

його фізичний сенс стає менш прозорим, проте такий показник виявляється чутливим до фізичних властивостей матеріалу і може бути використаний як критерій якості мікроструктури принаймні для одного класу матеріалів. Для перевірки існування зв'язку між запропоновани-

ми показниками та фізичними властивостями матеріалу розраховували коефіцієнт кореляції за відомим співвідношенням

$$R = \frac{COV(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y}, \quad (3)$$

де X – масив значень фізичної величини; Y – масив значень геометричної характеристики мікроструктури, що прийнята за показник її якості.

Метою статті є експериментальна перевірка впливу ступеня наближення мікроструктури до регулярної на фізичні властивості матеріалів для електричних дугогасійних контактів.

Для досліджень взяли три партії зразків порошкових матеріалів складу Cr-50 % мас.–Cu. Зразки отримували наступним чином: приготовані порошки хрому ПХ-1 та міді ПМС-1 змішували в атриторі, потім пресували під тиском 300–400 МПа та спікали за температури 1150–1200 °С в водні, потім доущільнювали методом гарячого штампування за температури 850 °С до відносної густини 0,97–0,99 від теоретичної з наступним відпалом за температури 650 °С в аргоні для зняття механічних напружень. Поділ на три партії було зроблено в залежності від пористості, при цьому зразки третьої партії перед гарячим штампуванням доущільнювали під тиском 500–700 МПа за кімнатної температури. Кожна партія включала до 15 зразків. Виготовлені на зразках шліфи фотографували цифровою камерою, а цифрові зображення мікроструктур обробляли за допомогою програми АМІС [6] (рис. 2), що дало змогу отримати дані кількісної металографії та обчислити значення показників (1), (2) і фрактальні розмірності мікроструктур [4].

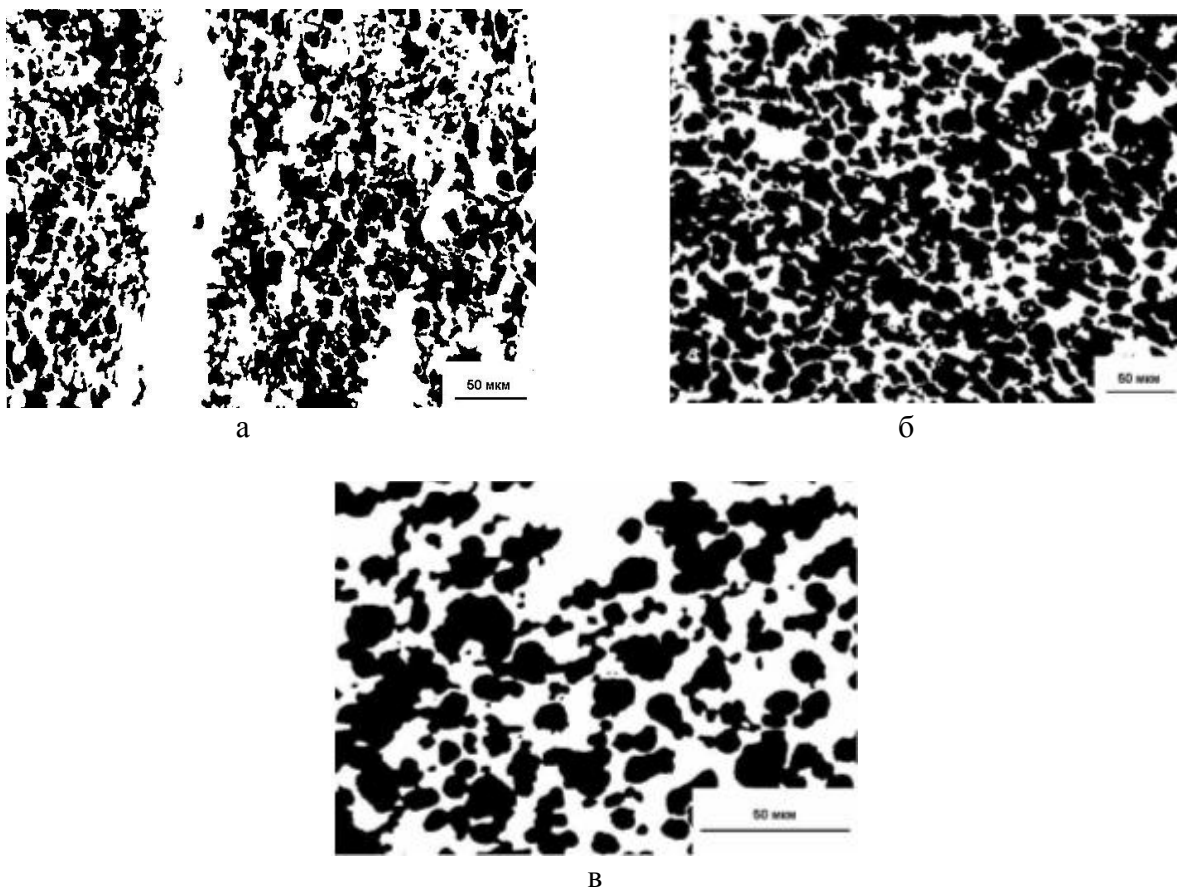


Рис. 2. Мікроструктури матеріалів після обробки програмою АМІС:
а – першої партії, б – другої партії, в – третьої партії. Частинки міцної фази мають чорний колір

Далі при випробуваннях на розтяг визначили механічні показники міцності та виміряли питому електричну провідність зразків. Фізичні властивості матеріалів та геометричні характеристики мікроструктури звели в табл. 1. На основі даних табл. 1, розрахували значення коефіцієнту кореляції, які звели в табл. 2.

Таблиця 1

Фізичні властивості матеріалів та геометричні характеристики мікроструктури зразків, отриманих методом гарячого штампування

№ пар тії	Властивості матеріалу та геометричні характеристики мікроструктури							
	Від- носна гус- тина	Питома електро- провід- ність, МСм/м	Грани- ця плин- ності, МПа	Грани- ця мі- цності, МПа	Відносне подов- ження, %	Показник регуляр- ності	Нормова- ний пока- зник ре- гулярнос- ті	Фрак- тальна розмір- ність
1	0,983	13,89±0,35	305±17	478±23	7±1	0,67	2,63	1,87
2	0,986	22,22±0,67	346±15	485±24	9,8±1	0,91	4,1	1,94
3	0,970	12,82±0,38	314±16	448±22	3,2±1	0,87	2,72	1,88

Таблиця 2

Кореляція між геометричними характеристиками мікроструктури та фізичними властивостями матеріалів

Геометричні характеристики мікроструктури	Коефіцієнт кореляції між геометричною характеристикою мікроструктури та фізичною властивістю матеріалу			
	Питома електропровідність	Границя плинності	Границя міцності	Відносне подов- ження
Показник регулярності	0,544	0,777	-0,187	0,069
Нормований показник регулярності	0,987	0,988	0,604	0,787
Фрактальна розмірність	0,972	0,998	0,540	0,736

З табл. 2 видно, що показник регулярності, розрахований за формулою (1), слабо пов'язаний з фізичними властивостями матеріалів, та не може бути використований як надійний критерій якості мікроструктури. Навпаки, нормований коефіцієнт регулярності, розрахований за формулою (2), та фрактальна розмірність сильно пов'язані як з питомою електричною провідністю, так і з границею плинності, дещо слабше – з відносним подовженням, тобто гірше характеризують пластичність матеріалу, і ще слабше – з границею міцності, але зв'язок залишається помітним. Цікавим є те, що відоме рівняння Холла–Петча [7–9] для однофазних матеріалів описує зростання саме границі плинності зі зменшенням розміру зерна. Відповідь на питання, чи є це випадковим співпадінням і чи є запропоновані показники досить надійними критеріями якості мікроструктур для інших класів матеріалів, отриманих іншими методами, потребує подальших досліджень.

ВИСНОВКИ

Показано, що запропонований нормований показник регулярності, розрахований за формулою (2), та фрактальна розмірність мікроструктури сильно пов'язані з критичними для матеріалів електротехнічного призначення фізичними характеристиками – питомою електричною провідністю та механічною міцністю – принаймні для матеріалів системи Cr50 % мас.–Cu, отриманих методом гарячого штампування, і тому можуть бути використані як критерії якості мікро-

структури. При цьому обчислювання нормованого показника якості потребує значно менших ресурсів і часу, тому цей показник має перевагу над фрактальною розмірністю. Вирішення питання про універсальність запропонованого показника потребує подальших досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Slade Paul G. *The vacuum interrupter – theory, design, and application* / Paul G. Slade. – Boca Raton–London–New York : CRC Press, 2008. – 510 p.
2. Хоменко Е. В. Влияние деформационной обработки на свойства композита Cu-50%Cr / Е. В. Хоменко, Г. А. Баглюк, Р. В. Минакова // *Порошковая металлургия*. – 2009. – № 3/4. – С. 111–118.
3. Чернявский К. С. *Стереология в металловедении* / К. С. Чернявский. – М. : Металлургия, 1977. – 280 с.
4. Falconer K. *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications* / K. Falconer. – New York : John Wiley&Sons, 1990. – 288 p.
5. Хоменко О. І. Кількісний показник регулярності мікроструктури матеріалу / О. І. Хоменко, Г. А. Баглюк // *Наукові нотатки : міжвузівський збірник (за галузями знань «Технічні науки»)*. – Луцьк : ЛНТУ, 2015. – Вип. 49. – С. 155–159.
6. Хоменко О. І. Використання програмного комплексу АМІС для кількісної металографії / О. І. Хоменко, О. В. Хоменко // *Математичні моделі та обчислювальний експеримент в матеріалознавстві. Праці Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України*. – Київ : ІПМ НАНУ, 2014. – Вип. 16. – С. 35–42.
7. Hall E. O. *Deformation and ageing of mild steel* / E. O. Hall // *Proc. Phys. Soc. London. Ser.B.* – 1951. – Vol. 64. – № 1. – P. 747–753.
8. Petch N. J. *The cleavage strength of polycrystals* / N. J. Petch // *J. Iron and Steel Inst.* – 1953. – Vol. 174. – P. 25–28.
9. Фирстов С. А. Особенности влияния микроструктуры на прочность композиционных материалов при статическом циклическом нагружении / С. А. Фирстов, Ю. Ф. Луговский // *Электронная микроскопия и прочность материалов. Труды Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины*. – Киев : ИПМ НАНУ, 2015. – Вып. 15. – С. 83–88.

REFERENCES

1. Slade Paul G. *The vacuum interrupter – theory, design, and application* / Paul G. Slade. – Boca Raton–London–New York : CRC Press, 2008. – 510 p.
2. Homenko E. V. *Vliyanie deformacionnoj obrabotki na svojstva kompozita Cu-50%Cr* / E. V. Homenko, G. A. Bagljuk, R. V. Minakova // *Poroshkovaja metallurgija*. – 2009. – № 3/4. – S. 111–118.
3. Chernjavskij K. S. *Stereologija v metallovedenii* / K. S. Chernjavskij. – M. : Metallurgija, 1977. – 280 s.
4. Falconer K. *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications* / K. Falconer. – New York : John Wiley&Sons, 1990. – 288 p.
5. Homenko O. I. *Kil'kisnij pokaznik reguljarnosti mikrostrukturi materialu* / O. I. Homenko, G. A. Bagljuk // *Naukovi notatki : mizhvuzivs'kij zbirnik (za galuzjami znan' «Tehnichni nauki»)*. – Luc'k : LNTU, 2015. – Vip. 49. – S. 155–159.
6. Homenko O. I. *Vikoristannja programnogo kompleksu AMIS dlja kil'kisnoi metalografii* / O. I. Homenko, O. V. Homenko // *Matematichni modeli ta obchisljuval'nij eksperiment v materialoznavstvi. Praci Institutu problem materialoznavstva im. I. M. Francevicha NAN Ukraini*. – Kiiv : IPM NANU, 2014. – Vip. 16. – S. 35–42.
7. Hall E. O. *Deformation and ageing of mild steel* / E. O. Hall // *Proc. Phys. Soc. London. Ser.B.* – 1951. – Vol. 64. – № 1. – P. 747–753.
8. Petch N. J. *The cleavage strength of polycrystals* / N. J. Petch // *J. Iron and Steel Inst.* – 1953. – Vol. 174. – P. 25–28.
9. Firstov S. A. *Osobennosti vlijanija mikrostruktury na prochnost' kompozicionyh materialov pri staticheskom ciklicheskom nagruzenii* / S. A. Firstov, Ju. F. Lugovskij // *Jelektronnaja mikroskopija i prochnost' materialov. Trudy Instituta problem materialovedenija im. I. N. Francevicha NAN Ukrainy*. – Kiev : IPM NANU, 2015. – Vyp. 15. – S. 83–88.

Хоменко О. І. – канд. техн. наук, ст. наук. співр. ІПМ НАНУ;

Хоменко О. В. – канд. техн. наук, ст. наук. співр. ІПМ НАНУ;

Баглюк Г. А. – д-р техн. наук, ст. наук. співр., заст. дир., зав. відділом 36 ІПМ НАНУ.

ІПМ НАНУ – Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, м. Київ.

E-mail: home-n-cow@yandex.ru, homhelen@mail.ru, gbag@gmail.com

Статья поступила в редакцию 25.09.2015