

# Обчислювальний експеримент в матеріалознавстві

---

УДК 539.3:620.22: 621.762 <https://doi.org/10.15407/materials2022.04-05.003>

## Вплив забрудненості порошку на поріг протікання металокерамічних композитів, що отримуються на основі полідисперсних порошкових сумішей

А. В. Кузьмов<sup>1, 2\*</sup>, М. Б. Штерн<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України  
Україна, 03142, Київ, вул. Кржижановського, 3

\*E-mail: [kavipms326@gmail.com](mailto:kavipms326@gmail.com)

<sup>2</sup>Національний технічний університет України “Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського”  
Україна, 03056, Київ, пр-т Перемоги, 37

*Методом комп'ютерного моделювання порогу протікання композита порошкового походження показано, що у випадку, коли розмір частинок провідника зменшується по відношенню до розміру частинок ізолятора, електропровідність може досягатись навіть для невеликого вмісту провідної фази. Таким чином можна керувати провідністю металокерамічного композита, не змінюючи концентрацію провідної фази, а лише варіюючи розмір частинок металу й кераміки. Але, як показали результати імітаційного моделювання, такий спосіб керування провідністю є вельми чутливим до окисненості порошку металу. Навіть відносна окисненість поверхні порошку 0,1 вже в рази збільшує необхідну для протікання концентрацію металічної фази.*

**Ключові слова:** бідисперсна упаковка, поріг протікання, балістична засипка, металокерамічні композити, окиснені порошки металів.

### Вступ

Ціла низка композиційних матеріалів виробляється на основі полідисперсних порошкових сумішей, що включають як провідну, так і ізоляційну або дуже слабо провідну фазу. Наприклад, керамічні матеріали, як правило, є гетерофазними системами, в яких фізичні властивості окремих фаз можуть досить сильно відрізнятись. Для керамічних композитів спостерігається відмінність в провідності окремих фаз на 10—15 і більше порядків. Такого роду композити широко використовуються як об'ємні резистори різноманітного призначення. Крім того, додавання провідної фази в діелектрик може мати на меті технологічні цілі (використання діелектричного нагріву, електрофізичних методів обробки і т. і.).

Діелектрична проникність окремих фазових складових в сегнетоелектричній кераміці може відрізнятись на 3—4 порядки, мається на увазі власне сегнетоелектрична фаза ( $\epsilon = 10^3$ — $10^4$ ) та склофаза ( $\epsilon$  порядку кількох одиниць).

В системах такого типу провідність залежить не тільки від концентрації фаз, але й від співвідношення між розмірами частинок окремих фаз. В таких композитах взаємне розташування в просторі провідної та ізолюючої фаз, як правило, носить нерегулярний (статистичний) характер. Ефективна провідність таких композитів характеризується тим, що за умови концентрації провідника, меншій за деяке ненульове значення, ця провідність стає нульовою [1, 2]. Це граничне значення концентрації провідника називається порогом протікання. Величина порогу протікання обумовлена характером взаємного розміщення в просторі провідної та ізолюючої фаз, який, в свою чергу, для реального композита порошкового походження є наслідком цілого ряду фізичних процесів його отримання (засипка, змішування, пресування, твердо- та рідкофазне спікання і т.і.). Також в метало-керамічних композитах порошкового походження ефективна провідність та поріг протікання чутливі до окиснення або різного роду забруднення неметалевими речовинами поверхні вихідного порошку металу. Теоретичному дослідженню методом імітаційного комп'ютерного моделювання впливу саме цих двох чинників — розмірів частинок та забрудненості поверхні порошку металу, на поріг протікання металокерамічних композитів порошкового походження присвячена дана робота.

#### **Підходи до моделювання мікроструктури композита**

Для композитів порошкового походження з ізомерними частинками фаз існують аналітичні теорії статистичних ефективних властивостей, побудовані на основі досить загальних міркувань [3—5]. У випадку, коли частинки провідної та діелектричної фаз суттєво відрізняються між собою, виникають труднощі щодо побудови аналогічних концентраційних залежностей для ефективних фізичних властивостей типу провідності (тепло- та електропровідність, пружні модулі, діелектрична та магнітна проникність і т. і.) в аналітичному вигляді. Тому в цьому випадку доцільно вдаватись до прямого чисельного моделювання. Причому перш ніж знаходити ефективні властивості та поріг протікання, треба знати геометрію взаємного розташування фаз. Якщо для випадку однакових частинок фаз прийнятне наближення можуть давати регулярні упаковки (і це підтверджується в даному дослідженні), то у випадку, коли фази суттєво відрізняються за формою чи розміром, проблема генерування належної упаковки постає з усією гостротою. Існує ціла низка різноманітних методів для генерування геометрії розподілу фаз (мікроструктури). Деякі з цих методів є цілковито уможливлені і не пов'язані ні з яким реальним фізичним процесом, що приводить до утворення композита. До таких методів слід віднести, наприклад, деякі методи з використанням поліедрів Вороного [6], коли можна довільним чином задавати деяку множину точок у просторі, а потім на основі алгоритму Вороного отримати таку систему поліедрів, що кожен поліедр містить у собі рівно одну точку з цієї множини. На нашу думку, досить

відірваними від реальності є також різні рекурсивні (або самоподібні) методи генерації мікроструктури [7], коли будується досить проста схема структури первинного наближення, а потім замість її складових підставляються схеми, подібні до первинної, але з випадковим чином заміненими деякими елементами, і ця процедура рекурсивно повторюється деяку кількість разів.

Автори цієї роботи ставили за мету моделювати композити порошкового походження і тому хотіли б використовувати спосіб генерації мікроструктури, який хоча б в деяких рисах відображав фізику одержання таких композитів. Разом з тим необхідно, щоб метод був достатньо ефективним з обчислювальної точки зору. Оскільки для більшості композитів, одержуваних методами порошкової металургії, першою технологічною операцією, яка формує їх мікроструктуру, є засипка порошкової суміші в пресс-форму, було вирішено генерувати мікроструктуру методом дискретного моделювання засипки порошку в деякий бункер. Хоча після засипки дисперсна система підлягає цілій низці подальших технологічних процесів (пресування, спікання), які значно впливають на мікроструктуру, як правило, саме засипка найбільш суттєво впливає на топологію взаємного розміщення фаз, а отже, і на поріг протікання.

#### **Методика знаходження порогу протікання на основі гравітаційно обумовленої упаковки**

Слід зазначити, що моделювання процесу засипки в загальній постановці методом чисельного інтегрування диференціальних рівнянь динаміки руху ансамблю дисперсних частинок є складною і громіздкою математичною задачею, яка потребує значного обсягу обчислень [8]. У цьому випадку обсяг обчислень швидко (нелінійно) зростає зі збільшенням кількості дисперсних частинок в ансамблі. Для наших потреб швидкість обчислень є надзвичайно важливою, бо для знаходження границі перколяції потрібно генерувати засипки з великою кількістю частинок, а процес генерування повторювати багато разів для подальшої статистичної обробки. Тому нами вирішено використовувати двовимірний генератор засипок на основі деяких припущень, що суттєво спрощують алгоритм генерації засипки та сприяють високої обчислювальної ефективності. Перерахуємо ці припущення:

кругла форма частинок;

повністю непружні зіткнення частинок між собою (відсутнє відскакування частинок під час зіткнення);

коли на засипку падає нова частинка, вона не змінює положення уже усталених частинок;

частинки засипаються „по одній”.

Алгоритм засипки, що побудований на основі таких припущень, в різних джерелах називається гравітаційною [9] або балістичною [10] засипкою. Коротко його суть можна описати так: поточна частинка спочатку падає до першого зіткнення, потім скочується по контактуючим з нею частинкам до тих пір, поки не знайде статично можливе положення рівноваги.

В результаті роботи програми засипки одержуються координати центрів частинок та інформація про міжчастинні контакти (топологію засипки). Далі встановлювався факт наявності чи відсутності протікання, тобто з'ясовується, чи можна сполучити верх та низ засипки будь-яким струмопровідним ланцюжком з контактуючих провідних частинок. На відміну від своїх попередніх досліджень [11, 12], в цій роботі автори враховували забрудненість (або окисненість) поверхні провідних частинок. Вважалось, що частина поверхні провідної частинки деяким випадковим чином окиснена, але відома частка окисненої поверхні

$$C_{ox} = \frac{S_{окиснена}}{S_{загальна}}.$$

Величина  $C_{ox}$  в подальшому називатиметься відносною

забрудненістю. Також припускається тонкість оксидної плівки порівняно з діаметром частинок і, відповідно, об'ємом окисненого матеріалу можна знехтувати. Відповідно об'ємні частки провідної  $C_{cond}$  та ізоляційної  $C_{ins}$  фаз залишаються пов'язаними між собою рівністю  $C_{cond} + C_{ins} = 1$ . За таких припущень, якщо контактують дві частинки провідника з однаковим  $C_{ox}$ , то ймовірність утворення струмопровідного контакту між ними дорівнюватиме  $(1 - C_{ox})^2$ . Тому після генерації упаковки частинок аналізується не просто каркас, утворений контактуючими між собою частинками провідника, але й враховується той фактор, що контакт двох частинок провідника буде струмопровідним лише з ймовірністю  $(1 - C_{ox})^2$ . Таким чином, в нашому випадку маємо комплексну задачу про протікання, як по ребрах, так і по вершинах [13]. Все описане проілюстровано на рис. 1, де показана випадковим чином генерована полідисперсна засипка з струмопровідним каркасом для випадків неокисненого (рис. 1, а) і окисненого порошоків (рис. 1, б) з часткою забрудненої поверхні  $C_{ox} = 0,2$ . Струмопровідний каркас на рис. 1 показаний шляхом з'єднання відрізком прямої центрів частинок, між якими може протікати струм.

Таким чином, здійснюється одиничне статистичне випробування для деякого конкретного фракційного складу порошкової шихти та забрудненості. Алгоритм упаковки, суміщений з аналізом протікання, реалізований

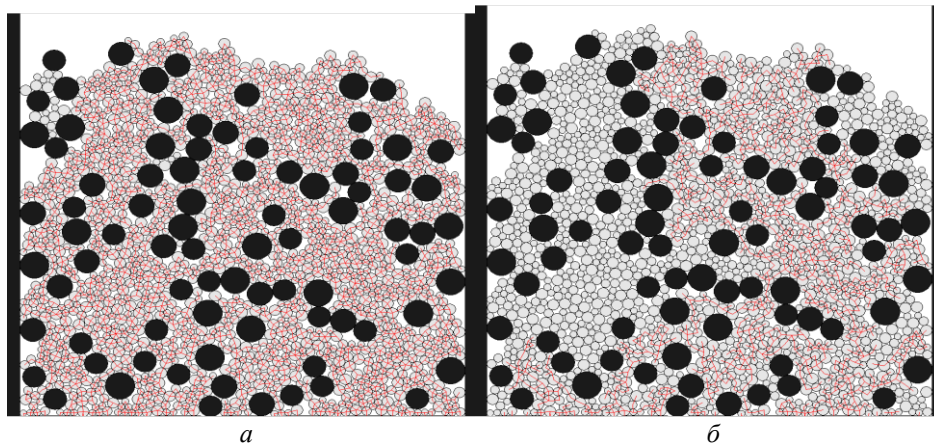


Рис. 1. Методологія побудови струмопровідного каркаса на основі упаковки для “чистого” (а) та “окисненого” (б) порошоків: чорні частинки — ізолятор, світлі — провідник, об'ємна частка провідника 0,68.

на мові програмування FORTRAN (стандарт FORTRAN 95) у вигляді динамічної програмної бібліотеки, яку можна викликати з середовища Matlab.

Описаним способом для кожного значення параметрів засипки випадковим чином генерувалась низка упаковок, для кожної з яких з'ясувався факт наявності чи відсутності провідності між верхом та низом упаковки. Потім, побудувавши для фіксованих значень відношення радіусів провідних та ізоляційних частинок та відносної окисненості криву залежності ймовірності протікання від об'ємної частки провідника, можна судити про поріг протікання по інтервалу концентрацій, на якому ймовірність протікання різко зростала від майже нульового значення до майже одиничного. Зі збільшенням числа частинок в засипці чи кількості імітаційних випробувань цей інтервал звужується, що дає можливість більш точно розраховувати величину порогу протікання. Беручи до уваги ідеалізований характер засипки, для знаходження порогу протікання задовольнялися точністю порядку 0,5 процента. Для дослідження порогу протікання кількість частинок, що засипались у бункер, була порядку  $10^6$ — $10^7$ , а кількість статистичних випробувань досягала  $10^2$ — $10^3$ .

### **Аналіз залежності порогу протікання від відношення розмірів частинок провідника та ізолятора і ступеня забрудненості поверхні порошку**

Моделюючи вплив різниці в розмірах між частинками провідника та діелектрика на провідність порошкового композита, природно розглянути бідисперсну суміш, в якій і провідна і ізолююча фази монодисперсні, але розмір провідних частинок відрізняється від розміру ізолюючих. Надалі радіус частинок провідника позначається  $R_c$ , а радіус частинок ізолятора —  $R_i$ . В своїх попередніх роботах [11, 12] автори досліджували вплив співвідношення між розмірами частинок провідника та ізолятора на провідність бідисперсної суміші провідних та ізолюючих частинок. В даній роботі теж вивчали поріг протікання бідисперсної суміші провідник—ізолятор, але вже з врахуванням забрудненості поверхні провідних частинок. Також, на відміну від робіт [11, 12], розглядався лише випадок, коли частинки провідника менші за частинки ізолятора. В даному випадку поріг протікання залежатиме від двох параметрів — співвідношення між розмірами частинок провідника та ізолятора та від забрудненості поверхні провідних частинок. Нами був обрахований поріг протікання для діапазона відношення розмірів частинок ізолятора до частинок провідника

$1 < \frac{R_i}{R_c} < 50$ , та для  $0 < C_{ox} < C_{ox}^{\max} = 1 - \sqrt{0,5} \approx 0,293$ , де  $C_{ox}^{\max}$  — таке граничне

значення відносної забрудненості, за якого перестає проводити струм правильна квадратна упаковка однакових частинок провідника. Величина  $C_{ox}^{\max} = 1 - \sqrt{0,5}$  зумовлена тим, що границя протікання по ребрах квадратної ґратки в точності дорівнює 0,5 [14]. Варто зауважити, що в результаті моделювання з'ясувалося, що граничне значення відносної забрудненості, за якого перестає проводити струм випадкова гравітаційна упаковка однакових частинок провідника, майже не відрізняється від  $C_{ox}^{\max}$ . Цей факт, скоріше за все, обумовлений тим, що, за алгоритмом гравітаційної засипки, середнє

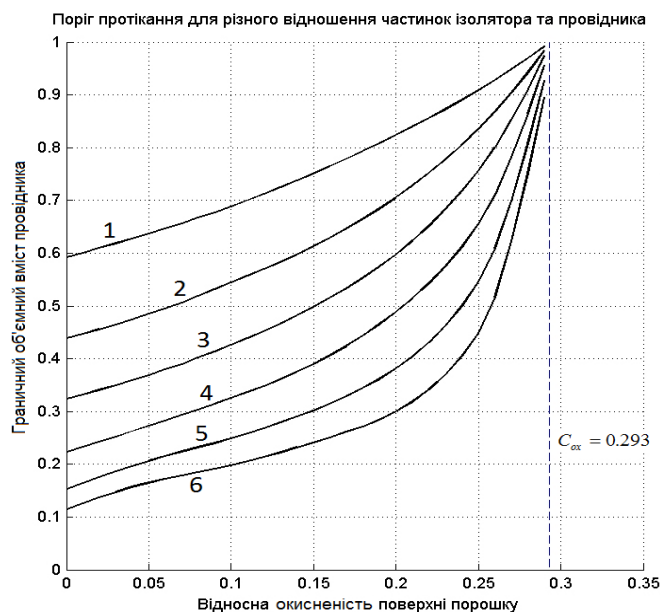


Рис. 2. Залежності порогу протікання бідисперсної упаковки від відносної забрудненості різних значень відношення розмірів частинок провідника та ізолятора  $R_i/R_c$ : 1 — 1; 2 — 2; 3 — 6; 4 — 12; 5 — 25; 6 — 50.

координаційне число швидко наближається до 4 (як і в правильній квадратній упаковці) зі збільшенням кількості частинок в засипці.

На рис. 2 наведено отримані нами залежності порогу протікання від відносної забрудненості для різних значень відношення розмірів частинок провідника та ізолятора, а на рис. 3 — залежності порогу протікання від відношення розмірів частинок провідника та ізолятора для різних значень відносної забрудненості.

Як відомо з експериментів та з практики отримання композитів порошкового походження, різниця в розмірах між частинками провідника та діелектрика дуже суттєво впливає на величину порогу протікання та взагалі на провідність композита [3, 15]. Це можна пояснити тим, що фаза з меншим розміром частинок схильна до збереження матричного характеру розташування в композиті навіть за досить малих її концентрацій [4] або, іншими словами, маленькі частинки схильні обгортати частинки великого розміру. В нашому чисельному експерименті теж досить чітко та виразно простежуються подібні тенденції. Як видно на рис. 2, для незабрудненого порошку зменшення порогу протікання майже шестикратно — з приблизно 0,6 за умови  $R_i/R_c = 1$  до приблизно 0,1 за умови  $R_i/R_c = 50$ .

Також досить помітною, приблизно 0,4—0,5, залишається різниця між порогами протікання для  $R_i/R_c = 1$  та  $R_i/R_c = 50$  і для випадку забрудненої поверхні порошку за умови  $C_{ox} < 0,2$ . Якщо  $C_{ox} > 0,2$  в міру наближення  $C_{ox}$  до  $C_{ox}^{max}$  вплив  $R_i/R_c$  зменшується.

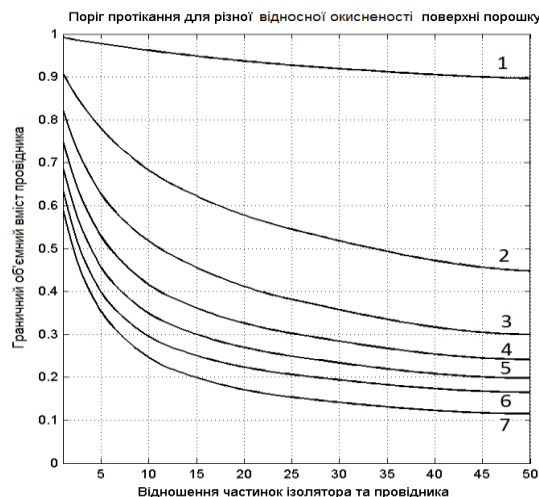


Рис. 3. Залежності порогу протікання бідисперсної упаковки від відношення розмірів частинок ізоляційної та провідної фаз для різних значень відносної забрудненості  $C_{ox}$ : 1 — 0,29; 2 — 0,25; 3 — 0,2; 4 — 0,15; 5 — 0,1; 6 — 0,05; 7 — неокиснений.

Крім того, варто зазначити високу чутливість порогу протікання до окиснення поверхні порошку за великих значень  $R_i/R_c$ . Так, якщо  $R_i/R_c = 50$ , достатньо відносної окисненості лише  $C_{ox} = 0,1$  для збільшення порогу протікання приблизно вдвічі з 0,1 до 0,2. А для суттєво окисненого порошку  $C_{ox} = 0,29$  збільшення порогу протікання майже дев'ятикратне.

### Висновки

Розроблено та реалізовано програмно теоретичну методику знаходження порогу протікання композитів порошкового походження, що отримуються на основі полідисперсних порошкових сумішей провідної та ізоляційної фаз. Разом з тим враховується як фракційний склад шихти, так і можливе окиснення поверхні порошку металу. Результати наших теоретичних досліджень якісно співпадають з експериментальними даними. Зокрема, чітко простежується залежність порогу протікання від відношення розмірів частинок провідної та ізоляційної фаз. А саме у випадку, коли розмір частинок провідника зменшується по відношенню до розміру частинок ізолятора, величина порогу протікання зменшується, тобто провідність може досягатись навіть за невеликого вмісту провідної фази. Ця властивість використовується в виробництві металокерамічних композитів, коли треба досягти певної провідності, не збільшуючи разом масову частку металічної фази. Але цей ефект виявляється вельми чутливим до окисненості порошку металу. Як показали результати моделювання, навіть відносна окисненість поверхні порошку 0,1 вже в рази збільшує необхідну для протікання концентрацію металічної фази.

### Список літератури

1. Шкловский В.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. Москва: Наука, 1979.

2. Kirpatrick S. Percolation and conduction. *Rev. Mod. Phys.* 1973. Vol. 45, No. 4. P. 574—582. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.45.574>
3. Скороход В.В. Теория физических свойств порошковых и композиционных материалов и принципы управления их микроструктурой в технологических процессах. *Порошковая металлургия*. 1995. № 1/2. С. 53—71. <https://doi.org/10.1007/BF00559852>
4. Скороход В.В. Структурно–перколяционные эффекты в теории обобщенной проводимости керамики и керамических композитов. Валерий Владимирович Скороход. К 70–летию со дня рождения / Под ред. А.Г. Косторнова. Киев: ИПМ НАНУ, 2004. С. 314—321.
5. Николенко А.Н., Ковальченко М.С. Анализ случайной упаковки идентичных частиц. I. Общая теория. *Порошковая металлургия*. 1985. № 11. С. 38—42. <https://doi.org/10.1007/BF00802549>
6. Кадушников Р.М., Бекетов А.Р. Геометрическое моделирование структуры полидисперсных материалов. *Порошковая металлургия*. 1989. № 10. С. 69—74. <https://doi.org/10.1007/BF00796178>
7. Привалко В.П., Новиков В.В., Яновский Ю.Г. Основы теплофизики и реофизики полимерных материалов. Киев: Наук. думка, 1991. 232 с.
8. Лотиш В.В., Неуш Н.Ю. Застосування триангуляційного алгоритму пошуку контактів при моделюванні потоку частинок методом DEM. Міжвузівський зб. „Наукові нотатки” ЛДТУ. 2004. Вип. 14. С. 159—163.
9. Takashi Itoh, Yoshimoto Wanibe. *Proc. of Int. Workshop on Modelling of Metal Powder Forming Processes*, Grenoble, France, 21—23 July 1997. P. 169—178.
10. Скороход В.В., Картузов В.В., Красиков И.В., Картузов Е.В. Имитационное моделирование упаковки частиц (двумерный случай). *Некоторые модели в математической физике и методы их исследования*. Киев: ИПМ НАНУ, 1997. С. 155—170.
11. Константинова О.В., Кузьмов А.В., Скороход В.В., Штерн М.Б. Граница перколяції та статистичні ефективні властивості композитів на основі полідисперсних порошкових сумішей. *Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении*. Киев: ИПМ НАН Украины. 2006. Вып. 8. С. 3—11.
12. Константинова О.В., Кузьмов А.В., Скороход В.В., Штерн М.Б. Численное моделирование влияния соотношения размеров частиц проводящей и изолирующей фаз на проводимость композитов типа проводник—изолятор порошкового происхождения. *Порошковая металлургия*. 2007. № 1/2. С. 31—40. <https://doi.org/10.1007/s11106-007-0005-9>
13. Кестен Х. Теория просачивания для математиков. Пер. с англ. Москва: Мир, 1986. 392 с.
14. Хеерман Д.В. Методы компьютерного эксперимента в теоретической физике. Пер. с англ. / Под ред. С.А. Ахманова. Москва: Наука, 1990. 176 с.
15. Скороход В.В., Петровский В.Я., Гетьман О.И. Особенности микроструктуры проводящих композитов на основе нитридов алюминия и кремния с добавками тугоплавких металлоподобных соединений переходных металлов. *Modern Ceramic Materials and Materials Testing Methods* / Ed. by J. Ranachowski, J. Raabe, L. Stoch. Krakow, 1996. P. 17—27.

### References

1. Shklovskii, V. I. and Efros, A. L. (1979). *Electronic Properties of Alloyed Semiconductors* Moscow: Nauka [in Russian].
2. Kirpatrick, S. (1973). Percolation and conduction. *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 45, No. 4, pp. 574—582. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.45.574>
3. Skorokhod, V. V. (1995). Theory of the physical properties of porous and composite materials and the principles for control of their microstructure in manufacturing processes. *Powder Metall. Met. Ceram.*, No. 1/2, pp. 53—71 [in Russian]. <https://doi.org/10.1007/BF00559852>
4. Skorokhod, V. V. (2004). Structural percolation effects in the theory of generalized conductance for ceramics and for ceramic composites. Kyiv: IPM NAS of Ukraine, pp. 314—321 [in Russian].
5. Nikolenko, A. N., Koval'chenko, M. S. (1985). Analysis of the random packing of identical particles. I. General theory. *Powder Metall. Met. Ceram.*, No. 11, pp. 38—42 [in Russian]. <https://doi.org/10.1007/BF00802549>
6. Kadushnikov, R. M., Beketov, A. R. (1989). Geometrical modeling the structure of polydispersed materials. *Powder Metall. Met. Ceram.*, No. 10, pp. 69—74 [in Russian]. <https://doi.org/10.1007/BF00796178>
7. Privalko, V. P., Novikov, V. V. and Yanovskii, Yu. G. (1991). *Introduction to Thermophysics and Rheophysics of Polymeric Materials*. Kiev: Nauk. dumka, 232 p. [in Russian].



8. Lotysh, V. V., Neush, N. Yu. (2004). The application of the triangulation algorithm for searching for contacts in the simulation of the flow of particles by the DEM method. Scientific Notes: Intercollegiate Collection of Sciences, LNTU, Lutsk, Is. 14, pp. 159—163 [in Ukrainian].
9. Takashi Itoh, Yoshimoto Wanibe. (1997). Proceedings of International Workshop on Modelling of Metall Powder Forming Processes, Grenoble, France, 21—23 July, pp. 169—178.
10. Skorokhod, V. V., Kartuzov, V. V., Krasikov, I. V., Kartuzov, E. V. (1997). Simulating particle packing (two-dimensional case). Nekotorye Modeli v Matematicheskoy Physike i Metody ih Issledovaniya, Kiev: IPM NANU, pp. 155—170 [in Russian].
11. Konstantinova, O. V., Kuz'mov, A. V., Skorokhod, V. V., Shtern, M. B. (2006). Percolation limit and statistical effective properties of composites based on polydisperse powder mixtures. Matematicheskie Modeli i Vychislitelnyy Experiment v Materialovedenii, Kiev: IPM NANU, pp. 3—11 [in Ukrainian].
12. Konstantinova, O. V., Kuz'mov, A. V., Skorokhod, V. V., Shtern, M. B. (2007). Effect of the particle size ratio on the conductivity of conductor-insulator powder composites: Numerical simulation. Powder Metall. Met. Ceram., No. 1/2, pp. 31—40 [in Russian]. <https://doi.org/10.1007/s11106-007-0005-9>
13. Kesten, H. (1982). Percolation Theory for Mathematicians. Birkhäuser, Boston, 423 p.
14. Heerman, D. V. (1990). Computer Simulation Methods in Theoretical Physics. Berlin-Heidelberg: Springer, 145 p.
15. Skorokhod, V. V., Petrovskii, V. Ya. and Get'man, O. I. (1996). Microstructure of conducting composites based on aluminum and silicon nitrides with additives of refractory metallic compounds of transition metals. Modern Ceramic Materials and Materials Testing Methods, J. Ranachowski, J. Raabe, and L. Stoch (eds.), Krakow, pp. 17—27.

## **The influence of powder contamination on the percolation limit of metal-ceramic composites obtained from polydisperse powder mixtures**

A. Kuzmov<sup>1,2\*</sup>, M. Shtern<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute for Problems in Materials Science NAS of Ukraine, Kyiv

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv

\*E-mail: [kavipms326@gmail.com](mailto:kavipms326@gmail.com)

*A theoretical method of finding by simulation computer modeling the percolation limit of composites of powder origin, which are obtained on the basis of polydisperse powder mixtures of the conductive and insulating phase, is proposed. At the same time, the degradation of the conductivity of conductor particles skeleton due to oxidation or other contamination of the surface of the particles is taken into account. To study the flow threshold of materials obtained on the basis of polydisperse powder mixtures, the use of regular packings of particles, which are considered in the classic problems of percolation theory, for example, square or hexagonal packing, is not acceptable even in the first approximation. Because in such packages all particles are the same, or the ratio of particle sizes is fixed. At the same time, as is known from the practice of obtaining metal-ceramic composites, the size distribution of conductor and insulator particles is one of the determining factors. Therefore, a generator of random filling of a polydisperse mixture of round particles into a rectangular hopper was developed using the Fortran programming language. The influence of the particle size ratio of the conductive and insulating phases and the relative contamination of the conductor particles on the percolation limit in the composite was studied. It is shown that in the case when the size of the conductor particles decreases in relation to the size of the insulator particles, the value of the percolation limit decreases, that is, conductivity can be achieved even with a small content of the conductive phase. In this way, the conductivity of the metal-ceramic composite can be controlled without changing the concentration of the conductive phase, but only by varying the size of the metal and ceramic particles. But as the simulation results showed, this method of controlling the conductivity is very sensitive to the oxidation of the metal powder. Even a relative oxidation of the powder surface of 0,1 doubles the concentration of the metal phase required for percolation.*

**Keywords:** bidisperse packaging, percolation limit, ballistic filling, metal-ceramic composites, oxidized metal powders.