

Є.Г. Биба^{1,2}, канд. техн. наук, доц., доц. кафедри, e-mail: byba.evgen@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1696-300X>

А.В. Мініцький¹, д-р техн. наук, проф., проф. кафедри, e-mail: aminitsky@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0001-5767-4071>

В.В. Коваленко¹, здобувач вищої освіти, e-mail: vitaly.kovalenko1983@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-9120-6533>

Б.В. Кивгило¹, аспірант, e-mail: kyvhylo.bohdan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5890-9020>

М.М. Ямшинський¹, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри, e-mail: yamshinskiy@ukr.net,

<https://orcid.org/0000-0002-2293-2939>

І.В. Лук'яненко¹, канд. техн. наук, доцент, e-mail: lukianenkoiv@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0002-1043-9688>

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

²Інститут прикладних систем управління Національної академії наук України (Київ, Україна)

Вплив гранулометричного складу пороутворювача на структуру та властивості пористого литого алюмінію

Пористі матеріали з порошків алюмінію привертають увагу завдяки недефіцитності вихідної сировини, високій корозійній стійкості та низькій густині порівняно з аналогічними матеріалами на основі міді та нержавіючої сталі. Однак ці матеріали поки не знайшли широкого практичного застосування через наявність на поверхні частинок алюмінієвого порошку невідновлюваної плівки оксиду алюмінію, яка перешкоджає утворенню металевих контактів між частинками. Всі ці проблеми можуть бути вирішені за допомогою пористого литого алюмінію. Пористий литий алюміній має кращі характеристики, що робить його перспективним аналогом запропонованих пористих проникних матеріалів.

В роботі було проаналізовано технологічні параметри отримання пористого литого алюмінію (ПЛА) методом вакуумного просочування з використанням пороутворювача NaCl.

Встановлено, що розмір частинок пороутворювача безпосередньо впливає на пористість: більші частинки зменшують контактну площу та менш щільно розміщуються у тілі матеріалу. Геометрична форма частинок також впливає на пористість: частинки неправильної форми мають більшу контактну площу і більш щільно упаковуються порівняно зі сферичними частинками. Виявлено, що NaCl повністю екстрагується з зразків, пори мають різноманітні геометричні форми, і зі збільшенням фракції пороутворювача розмір пор зростає. Аналіз мікроструктур показав, що зі збільшенням фракції пороутворювача середній розмір пор і апертур також збільшується.

Визначено, що розмір пороутворювача визначає характеристики міцності ПЛА, зі збільшенням фракції пороутворювача, відповідно і розміру пор, відбувається підвищення міцності.

Встановлено, що коефіцієнт проникності є чутливим до перепаду тиску і суттєво збільшується зі зростанням розміру пор, який визначається гранулометричним складом наповнювача. Крім того встановлено, що чим більша пористість, тим вищий коефіцієнт проникності.

Результати досліджень показали перспективність застосування ПЛА в якості фільтрувальних елементів, що працюють в умовах значних перепадів тиску і агресивних середовищах.

Ключові слова: наповнювач, структура, алюмінієвий сплав, межа міцності на стик, температура заливання, металева форма (кокіль), розмір та форма пор, коефіцієнт проникності.

Вступ. Сучасне машинобудування не може обійтись без пористих матеріалів. Це фільтри газів та рідин, звукоізоляційні панелі, демпфери, теплообмінники, вогнегасники, теплові труби, гніти. Область застосування пористих матеріалів поступово розширюється. Вже більш 100 років їх виготовляють спіканням з порошків бронзи, нікелю, нержавіючих сталей. Але технологія спікання має багато обмежень через необхідність застосування спеціальних захисних середовищ.

Високопористі матеріали мають забезпечувати певні експлуатаційні характеристики, які іноді є взаємовиключними. До таких відносяться:

- висока пористість при задовільній механічній міцності (пористість визначає продуктивність фільтрів, теплопровідність матеріалу, а форма і розмір пор — ступінь очищення; міцність, в свою чергу, визначає механічні навантаження, які здатні витримувати високопористі матеріали);

- корозійна стійкість і жаростійкість під час використання високопористих матеріалів в якості фільтрів для очищення агресивних і нагрітих середовищ;

- підвищені пластичність і припрацьовуваність при використанні їх в якості ущільнювачів;

- висока питома поверхня пор при використанні їх в якості електродів акумуляторів енергії та каталізаторів;

- здатність тривалий час зберігати високі експлуатаційні властивості, легко піддаватися очищенню та регенерації, не забруднювати фільтроване середовище в процесі роботи [1, 2].

На відміну від сітчастих, керамічних, скляних, тканинних, фетрових, картонних та інших матеріалів, металеві проникні матеріали більшою мірою відповідають викладеним вимогам. Вони міцніші, витримують різкі теплозміни, високу корозійну стійкість, електропровідність, здатність протистояти високим тискам, забезпечувати високий ступінь очищення.

На даний момент, є багато матеріалів, які підходять під ці умови, а саме: алюміній, титан, латунь, бронза, нержавіюча сталь. Матеріали різні за своїми властивостями, що дає змогу підібрати матеріал під певні вимоги.

Пористі проникні матеріали міді завдяки низькій корозійній стійкості знаходять обмежене застосування в якості матеріалів для фільтрів. Перспективне застосування таких матеріалів в якості конструктивних елементів різного роду теплообмінних пристроїв, що обумовлено їх високою теплопровідністю. Порошки бронзи марки БрОФ-10-1 найбільш часто використовуються в якості вихідного матеріалу для виготовлення пористих проникних матеріалів. Такі пористі проникні матеріали можуть витримувати нагрівання на повітрі до 200 °С та до 400 °С в неокиснювальному середовищі. Вони корозійностійкі в повітряному середовищі, морській воді та розчинах КОН.

Пористі проникні матеріали з порошків корозійностійких сталей знаходять широке застосування в зв'язку з їх високою корозійною стійкістю в кислотах, лугах та агресивних газах. Вони витримують нагрів на повітрі до 500 °С, а деякі сплави і до

більш високих температур.

Пористі проникні матеріали з порошків титану та його сплавів завдяки корозійній стійкості мають в багатьох випадках переваги над матеріалами з порошків бронзи, нержавіючої сталі та нікелю. Пористі проникні матеріали з порошків титану володіють корозійною стійкістю в середовищі хлору (хлоридів, солей хлористої кислоти, жавелевої води), в морській, солоній воді, азотній кислоті, органічних кислотах, нерозплавлених солях. Є дані про стійкість пористого титану в наступних середовищах: повна стійкість в 30 % розчині їдкого натру; задовільна стійкість в 25 % розчині хлористого алюмінію за температури розчину до 100 °С; стійкість пористого проникного матеріалу з титану, який містить 0,2—2 % паладію, в 20 % розчині соляної та 40 % розчині сірчаної кислоти за кімнатної температури.

Пористі проникні матеріали з порошків алюмінію привертають увагу до себе внаслідок недифіцитності вихідної сировини, високої корозійної стійкості, низької густини в порівнянні з аналогічними пористими проникними матеріалами з порошків на основі міді та нержавіючої сталі. Однак ці матеріали не знайшли поки широкого практичного застосування. Це зв'язано з наявністю на поверхні частинок алюмінієвого порошку невідновлюваної плівки оксиду алюмінію, яка перешкоджає утворенню металічних контактів частинок [3].

Альтернативою наведеним вище проникним матеріалам є пористий литий алюміній. Обумовлюється це наступними характеристиками та технологічними можливостями:

- велика пористість (від 50 до 60 %);
- регулюєма тонкість фільтрації (від 5 до 300 мкм);
- практично будь-яка форма та розмір виробів;
- розміри пор від 5 до 300 мкм;
- рівномірний розподіл пор по об'єму матеріалу;
- велика питома поверхня (від 2000 до 20000 м²/м³);
- межа міцності на стиск (від 30 до 90 Н/мм²);
- межа міцності на розтяг (від 7 до 30 Н/мм²) [4, 5].

Якщо порівняти пористий литий алюміній з пористим проникним матеріалом на основі алюмінію марки ПА-4, можна зробити висновок, що пористий литий алюміній володіє унікальними властивостями, що робить його перспективним матеріалом для використання в таких областях, як фільтрація, аерація рідин, демпферні елементи і так далі.

Пористий литий алюміній — високотехнологічний матеріал, що отримують методом просочуванням наповнювача з наступним його екстрагуванням. Виливки з пористого литого алюмінію використовуються в якості фільтр елементів, волого-масло-відокремлювачів, активних глушників шуму [6—8]. Область застосування пористого литого алюмінію поступово розширюється. Пористі алюмінієві виливки успішно конкурують з виробами зі спеченого металічного порошку за рахунок:

- можливості отримання виробів великих розмірів та будь-якої конфігурації з значно меншою собівартістю;
- можливістю поєднання в одному виробі пористої

та монолітної частини;

- більшою фільтруючою здатністю при однаковому гідрравлічному опорі;
- низької питомої ваги (пористі порошкові матеріали виготовляються з важких металів).

Значний інтерес до виготовлення нових композитів та технологій отримання піноматеріалів пояснюється наявністю у виробів з цих матеріалів незвичайного комплексу властивостей: низька щільність, низьке значення коефіцієнтів тепло- та електропровідності, високий опір дії вогню, екологічна чистота, можливість ефективно поглинати енергію удару.

Унікальні властивості пористого литого алюмінію роблять його перспективним матеріалом для використання в таких областях, як фільтрація, зниження шуму, теплообмін, пневмотранспорт, захист сенсорів, випаровування рідин (в тому числі для регазифікації скрапленого природного газу (СПГ)), аерація рідин, демпферні елементи на транспорті, вакуумні столи, декоративні вироби.

Існує багато різних способів одержання металічних пористих матеріалів [4]. Недоліком вказаних технологій є нестабільність матеріалу по пористості та розміру пор, мала дисперсність бульбашок, велика трудомісткість та висока вартість продукції із піноалюмінію.

З врахуванням переглянутих недоліків було запропоновано технологію отримання ПЛА з наперед заданими властивостями.

Дослідження проводилися на потужностях АТ «ЕЛМІЗ». За результатами дослідження на підприємстві налагоджено виробництво елементів фільтрів для різних галузей промисловості.

Постановка задачі. На сьогодні тема дослідження впливу гранулометричного складу пороутворювача на структуру та властивості пористого алюмінію не є достатньо вивченою. Саме тому метою роботи є дослідження структури та оцінки фільтраційних властивостей пористого литого алюмінію, отриманого методом вакуумного просочування.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- дослідити вплив гранулометричного складу пороутворювача NaCl на структуру ПЛА;
- дослідити вплив розміру пороутворювача NaCl

на фізико-механічні та проникні властивості ПЛА.

Результати дослідження. В якості об'єктів дослідження в роботі використовували наступні матеріали:

- сплав АК7;
- пороутворювач NaCl.

Здійснювали розподіл пороутворюючого наповнювача (NaCl) по фракціях за допомогою ситового класифікатора «Ротап». Досліджувались наступні фракції пороутворювача: 0,10—0,20 мм; 0,20—0,40 мм; 0,40—1,00 мм; 1,00—1,60 мм; 1,60—2,50 мм.

Для видалення залишкової вологи підігрівали наповнювач в муфельній печі МП-2У до температури 800 °С. Для запобігання спікання наповнювача, його регулярно перемішували під час нагрівання. Нагрітий наповнювач засипали у попередньо підігріту в камерній печі опору до 450 °С ливарну металеву форму (кокіль).

Плавлення металу здійснювали в печі опору СШОЛ-0,1/12,5. Температура заливання сплаву АК7 становила 750 °С. Охолодження виливка відбувається з кокілем на повітрі, в подальшому його піддавали механічному обробленню. Під час механічного оброблення відбувається очищення виливків від поверхневої суцільнометалевої плівки, видалення надливів та ливарних ухилів і надання необхідних геометричних форм і розмірів виробу. Для видалення пороутворюючого наповнювача оброблений виливок піддавали екстракції в воді за температури 100 °С. Відмитий від пороутворювача виріб сушили до повного видалення вологи в сушильній шафі СП-30.

Для визначення пористості, залежно від гранулометричного складу визначили фізичні параметри дослідних зразків (табл. 1).

Середній розмір пор визначався за довжиною хорд, отриманих внаслідок перетину пор випадковою прямолінійною січною в програмному забезпеченні SEO ImageLab та були експортовані у зображення для кожного зразка відповідно (рис. 1). Цей підхід дозволяє отримати статистично значущі дані щодо розподілу розмірів пор у матеріалі, що залежить від фракції пороутворювача. Використання програмного забезпечення SEO ImageLab гарантує надійну циф-

Таблиця 1

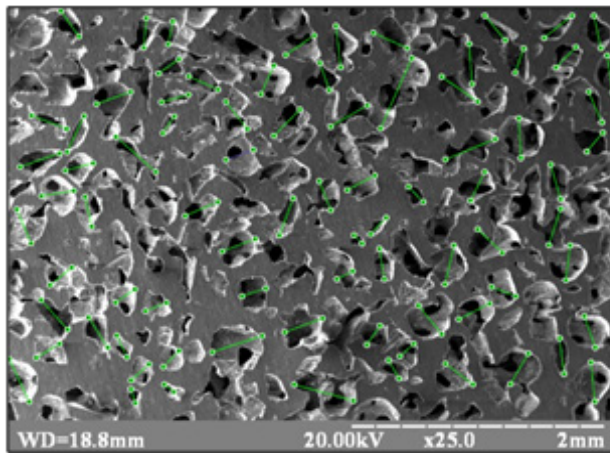
Результати розрахунків пористості ПЛА, залежно від гранулометричного складу

Фракція пороутворювача, мм	Висота зразка, мм	Діаметр зразка, мм	Маса зразка, г	Об'єм, см ³	Щільність, г/см ³	Відносна щільність	Пористість, %
0,10—0,20	5,47	19,93	1,73	1,701	1,017	0,378	67,18
0,20—0,40	5,41	19,95	1,50	1,691	0,887	0,329	65,01
0,40—1,00	5,49	19,91	1,66	1,709	0,971	0,361	63,88
1,00—1,60	5,37	19,96	1,72	1,680	1,024	0,381	61,93
1,60—2,50	5,02	20,04	1,74	1,583	1,352	0,503	59,13

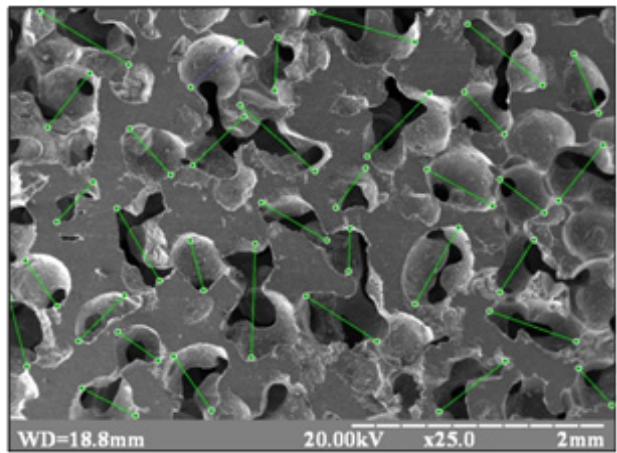
рову обробку зображень і мінімізує людський фактор. За результатами табл. 1 побудовано залежність пористості від фракції пороутворювача (рис. 2).

Розмір частинок пороутворювача має безпосередній вплив на пористість, адже чим більший

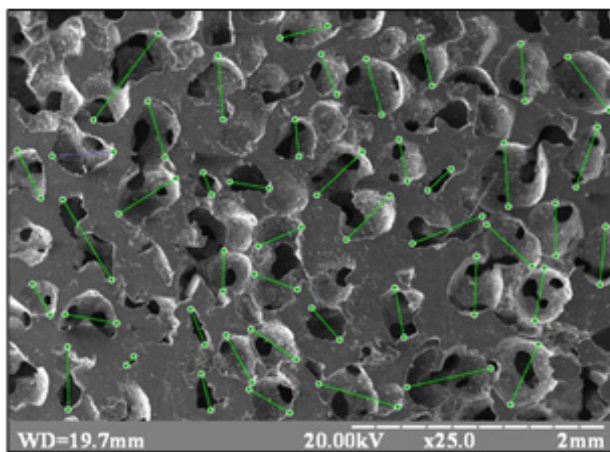
розмір частинок, тим меншу контактну площу вони мають та менш щільно розміщуються по об'єму тіла. Також грає роль геометрична форма частинок, як відомо частинки неправильної геометричної форми мають більшу контактну площу і більш щільно



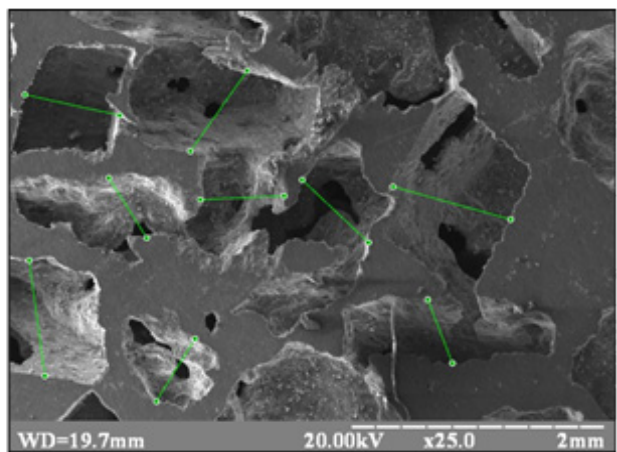
а



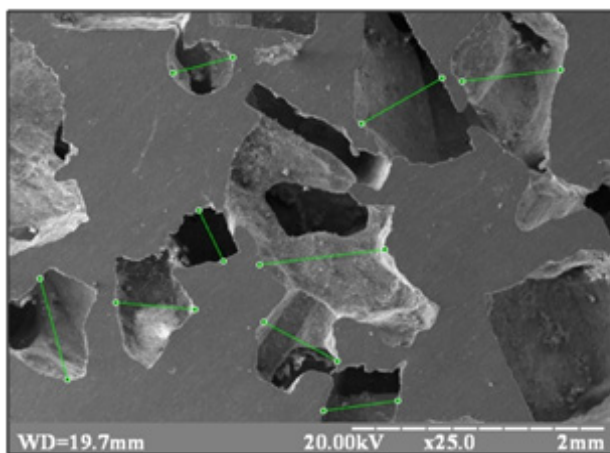
б



в



г



д

Рис. 1. Знімок визначення розміру пор з пороутворювачем розміром: а — 0,10-0,20 мм; б — 0,20-0,40 мм; в — 0,40-1,00 мм; г — 1,00-1,60 мм; д — 1,60-2,50 мм

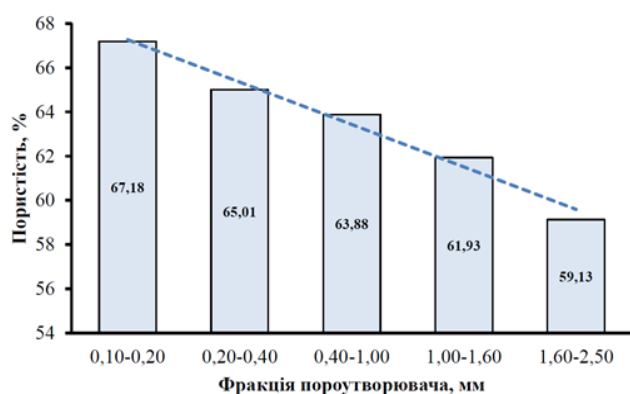


Рис. 2. Пористість зразків залежно від гранулометричного складу наповнювача

упаковуються в порівнянні зі сферичною формою частинок. В даній роботі використовували пороутворювач оскольчастої форми. Частинок неправильної геометричної форми (оскольчасті) мають більшу контактну площу та щільніше упаковуються, ніж частинки сферичної форми. Це впливає на розподіл і розмір пор у матеріалі після видалення пороутворювача, пори мають різну геометричну форму, і зі збільшенням фракції розмір пор збільшується.

З представлених мікроструктур можна зробити

висновок про те, що зі збільшенням фракції наповнювача, збільшується середній розмір пор та апертур.

Розрахувавши пористість, можна сказати про те, що найбільшу пористість має зразок ПЛА, де застосовувалась фракція пороутворювача 0,10—0,2 мм.

Розмір частинок пороутворювача є одним із ключових факторів, що визначають пористість матеріалу: великі частинки створюють більші пори, але зменшують їх кількість у матриці, оскільки займають більше об'єму й мають менше контактів із сусідніми частинками, а малі частинки створюють велику кількість дрібних пор через вищу щільність упаковки, що забезпечує більшу загальну пористість. Можна стверджувати, що щільність упаковки частинок впливає не лише на розмір пор, але й на їх розподіл у просторі.

Емпірично встановлено, що збільшення розміру частинок пороутворювача призводить до зростання розміру пор, і ця залежність є лінійною. Це можна пояснити механічним зв'язком між частинками: із збільшенням розміру частинок кількість зв'язків між ними зменшується, тому в матеріалі залишаються більші пустоти. Додаткове накладання вібрації під час інфільтрації додатково сприяє утворенню рівномірної структури з невеликою пористістю.

За допомогою отриманих даних в програмному забезпеченні SEO ImageLab було визначено середній розмір пор. Результати представлено в табл. 2.

Таблиця 2

Результати визначення розміру пор методом перетину пор прямолінійною січною

Фракція пороутворювача, мм	Кількість січних	Середній розмір січних, мкм	Максимальний розмір січної, мкм	Мінімальний розмір січної, мкм
0,10—0,20	81	263,019	616,025	92,04
0,20—0,40	85	425,632	864,766	95,214
0,40—1,00	88	566,834	1139,228	199,015
1,00—1,60	36	680,664	1390,558	147,579
1,60—2,50	35	988,366	1989,05	397,586

Для визначення механічних характеристик зразків ПЛА, застосовували випробування на стиснення. Випробування проводили на повіреній універсальній машині «CERAMTEST» потужністю до 10 т за ISO 133314:2011 (Е), що використовується для пористих зразків. Стандартні програми розрахунку кривих навантаження під час стиснення дають змогу розрахувати основні механічні характеристики виливків для цього виду випробувань.

Результати дослідження представлено в табл. 3 та на рис. 3.

Із збільшенням фракції пороутворювача від 1,00 до 2,50 мм збільшується міцність на стиск. Використання фракцій від 0,10 до 0,40 мм призводить до більш щільного компонування наповнювача, що сприяє утрудненому просочуванню рідкого розплаву.

В структурі пористого тіла концентрація напружень утворюється навколо пор, внаслідок чого

Таблиця 3

Дані та обрахунки границі міцності на стиск

Фракція пороутворювача, мм	Пористість, %	Площа поперечного перерізу м ²	Зусилля руйнування, Н	$\sigma_{\text{с}}^{\text{ст}}$, МПа
0,10—0,20	67,18	0,034197	575,939	16,84
0,20—0,40	65,01	0,034339	684,502	19,93
0,40—1,00	63,88	0,033907	634,669	18,84
1,00—1,60	61,93	0,033673	704,292	20,91
1,60—2,50	59,13	0,031605	801,043	25,34

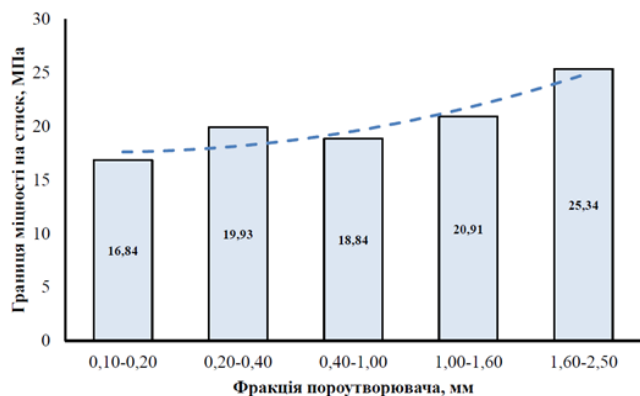


Рис. 3. Границя міцності на стиск залежно від гранулометричного складу наповнювача

зменшується контактний перетин, який обумовлений величиною загальної пористості. Наявність округлої мікроскопічної пори викликає збільшення концентрації напружень навколо неї приблизно в два рази, чим в об'ємі матриці матеріалу, і відповідно впливає на міцність залежно від фракції пороутворювача. Таким чином, зменшення розміру пор, регулювання їх розподілу та форми є перспективними засобами підвищення міцності.

Встановлено, що збільшення фракції пороутворювача від 1,00 до 2,50 мм підвищує міцність на стиск, тоді як використання сумішей дрібних фракцій (0,10—0,40 мм) спричиняє утруднену інфільтрацію рідкого розплаву, що впливає на формування кінцевої пористої структури.

В той же час рівномірність розподілу пор є ключовим фактором, що впливає на механічні властивості матеріалу. Рівномірно розподілені пори мінімізують локальні концентрації напружень, запобігаючи передчасному руйнуванню. Натомість нерівномірний розподіл пор, особливо за відкритої пористості, значно знижує міцність.

Форма пор також впливає на розподіл напружень. Округлі пори створюють рівномірну концентрацію напружень, що збільшується приблизно вдвічі порівняно з матрицею. Нерегулярні або витягнуті пори мають гострі краї, що сприяють локальним пікам напружень і більшому зниженню міцності матеріалу.

Збільшення розміру частинок пороутворювача від 1,00 до 2,50 мм сприяє утворенню більших, але рівномірно розподілених пор, що знижує локальні напруження в матеріалі. Така структура зменшує вплив пор на міцність, оскільки великі пори меншою мірою порушують загальну цілісність матриці. Навпаки, використання дрібних частинок пороутворювача (0,10—0,40 мм) сприяє утворенню щільно розташованих, дрібних пор, які можуть бути нерівномірно заповнені розплавом. Це може призводити до формування водночас закритих і відкритих пор, що підвищує концентрацію напружень і знижує міцність.

Капілярний ефект у дрібних проміжках між частинками додатково зменшує рівномірність заповнення рідким металом, що ускладнює формування цілісної матриці для механічно навантажених матеріалів.

Таким чином, зменшення розміру пор, їхнє рівномірне розташування та контроль форми є перспективними засобами для оптимізації характеристик пористих матеріалів. Вибір параметрів пороутворювача має ґрунтуватися на балансі між пористістю, рівномірністю розподілу пор і вимогами до механічної міцності кінцевого матеріалу.

Важливою характеристикою для фільтраційних елементів є гідравлічний опір. Для пористих матеріалів замість гідравлічного опору використовують коефіцієнт проникності. Випробування здійснювали в Інституті проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича НАН України на стенді для неруйнівного контролю плоских пористих зразків з компресором та ресивером, тим самим забезпечуючи можливість подачі повітря з тиском до 5 атм. Результати досліджень наведено на рис. 4.

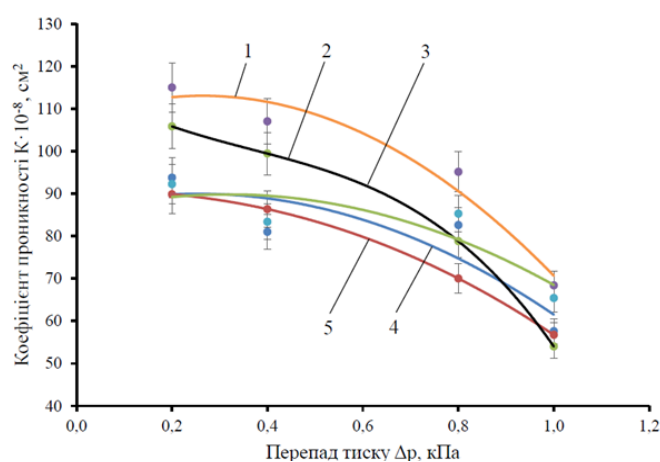


Рис. 4. Коефіцієнт проникності від перепаду тиску на пористих зразках ГЛА залежно від розмірів пороутворювача: 1 — 1,60-2,50 мм; 2 — 1,00-1,60 мм; 3 — 0,40-1,00 мм; 4 — 0,20-0,40 мм; 5 — 0,10-0,20 мм

Чутливість коефіцієнту проникності K до перепаду тиску Δp суттєво збільшується зі збільшенням розміру пор, яка визначається гранулометричним складом наповнювача. Головним фактором, який впливає на коефіцієнт проникності, є пористість, чим більша пористість, тим більший коефіцієнт проникності.

Збільшення розміру пор знижує гідравлічний опір потоку, що робить проникність матеріалу більш чутливою до змін перепаду тиску. Це явище пояснюється тим, що великі пори забезпечують вільніший рух рідини чи газу, зменшуючи вплив внутрішнього тертя. Крім того, великі пори сприяють переходу течії з ламінарного до турбулентного режиму, що може викликати нелінійне зростання проникності з підвищенням тиску.

Вища пористість означає більший об'єм вільного простору в структурі матеріалу, що полегшує проходження потоку. Висока пористість також покращує зв'язність пор, зменшуючи гідравлічний опір. Однак у матеріалах із низькою пористістю значна частина пор може бути ізольованою, що обмежує загальну проникність.

Результати визначення коефіцієнту проникності

показали, що розмір і об'єм пор є взаємозалежними і визначають чутливість проникності до перепаду тиску. Великі пори забезпечують основну пропускну здатність, але надмірно великі пори можуть призвести до нерівномірного розподілу потоків. Водночас висока пористість навіть із дрібними порами створює безліч капілярних шляхів для проходження рідини чи газу, підвищуючи загальну проникність. Великі пори сприяють зменшенню опору потоку, тоді як дрібні пори можуть створювати локальні перешкоди, збільшуючи чутливість проникності до змін перепаду тиску.

Для підвищення ефективності використання матеріалів із заданими параметрами проникності важливо враховувати вплив як розміру пор, так і загальної пористості. Оптимальний вибір гранулометричного складу наповнювача дозволяє досягти балансу між проникністю, механічною стійкістю та контрольованістю потоку. Крім того, рівномірний розподіл пор і уникнення надмірно великих чи занадто дрібних частинок є перспективними підходами для регулювання чутливості проникності до перепаду тиску.

Висновки

За результатами дослідження можна зробити висновки:

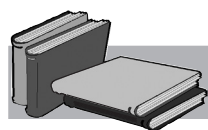
1. Пористий алюміній має значний потенціал за-

вдяки своїм ключовим характеристикам, таким як низька питома вага, висока міцність, теплопровідність та корозійна стійкість, що робить його ідеальним матеріалом для виготовлення фільтрів.

2. Встановлено, що зменшення розміру пор, їхнє рівномірне розташування та контроль форми є перспективними засобами для оптимізації характеристик пористих матеріалів. Вибір параметрів пороутворювача має ґрунтуватися на балансі між пористістю, рівномірністю розподілу пор і вимогами до механічної міцності кінцевого матеріалу.

3. Чутливість коефіцієнта проникності до перепаду тиску суттєво залежить від розміру пор і загальної пористості матеріалу. Збільшення розміру пор та пористості знижує опір потоку, підвищуючи проникність і її чутливість до змін тиску. Для оптимального регулювання проникності необхідно контролювати гранулометричний склад наповнювача, рівномірність розподілу пор та враховувати механічну стійкість матеріалу до деформацій під тиском.

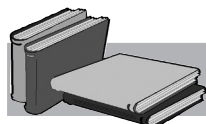
4. Розроблений матеріал є досить перспективним для виготовлення фільтрувальних елементів для очищення газу та рідин і є невід'ємною частиною промислового життя.



ЛІТЕРАТУРА

1. Shapovalov V., Boyko L. Gasar — A new Class of Porous Materials. *Advanced Engineering Materials*. 2004. Vol. 6. Iss. 6. P. 407—410. <https://doi.org/10.1002/adem.200405148>
2. Goodall R., Mortensen A. Porous Metals, 5th Ed. In: D.E. Laughlin, K. Hono (Eds.), *Physical Metallurgy*. Elsevier, Oxford, 2014. P. 2399—2595.
3. Витязь П.А., Капцевич В.М., Шелег В.К. Пористые порошковые материалы и изделия из них. Минск: Вышэйшая школа, 1987. 161 с.
4. Ashby M.F., Evans A.G., Fleck N.A., Gibson L.J., Hutchinson J.W., Wadley H.N.G. *Metal Foams: A Design Guide*. Elsevier, 2000. 251 p.
5. Finkelstein A., Husnullin D., Borodianskiy K. Design and Fabrication of Highly Porous Replicated Aluminum Foam Using Double-Granular Space Holder. *Materials*. 2021. Vol. 14. Iss. 7. <https://doi.org/10.3390/ma14071619>
6. Финкельштейн А.Б., Казанцев И.С., Юн И.А. Фильтрующие свойства пористого литого алюминия. Москва: Машиностроение, 2006. 60 с.
7. Surace R., De Filippis L.A.C., Ludovico A.D., Boghetich G. Influence of processing parameters on aluminium foam produced by space holder technique. *Materials & Design*. 2009. Vol. 30. Iss. 6. P. 1878—1885. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.09.027>
8. Furman E.L., Finkelstein A.B., Cherny M.L. Permeability of Aluminium Foams Produced by Replication Casting. *Metals*. 2013. 3(1). P. 49—57. <https://doi.org/10.3390/met3010049>
9. Nová I., Fraňa K., Solfronk P., Sobotka J., Koreček D., Švec M. Characteristics of Porous Aluminium Materials Produced by Pressing Sodium Chloride into Their Melts. *Materials*. 2021. Vol. 14. Iss. 17. <https://doi.org/10.3390/ma14174809>
10. Финкельштейн А.Б. Теория и практика получения пористых отливок из алюминиевых сплавов пропиткой. Екатеринбург, 2010. 40 с.
11. Рудь В.Д., Повстаной О.Ю., Заболотний О.В., Богінський Л.С. Технології, структура, властивості пористих проникних матеріалів. Монографія. Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2016. 200 с.
12. ГОСТ 25283-93. Материалы спеченные проницаемые. Определение проницаемости жидкостей. Взамен ГОСТ 25283-82; Введ. 01.01.1997. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации.

Надійшла 20.07.2025



REFERENCES

1. Shapovalov, V., & Boyko, L. (2004). Gasar — A new Class of Porous Materials. *Advanced Engineering Materials*, 6(6), 407-410. <https://doi.org/10.1002/adem.200405148>
2. Goodall, R., & Mortensen, A. (2014). Porous Metals. *Physical Metallurgy* (Fifth Edition), Elsevier, Oxford, pp. 2399-2595.
3. Vityaz, P. A., Kapsevich, V. M., & Sheleg, V. K. (1987). Poristye poroshkovye materialy i izdelia iz nikh [Porous powder materials and products made from them]. Minsk: Vysheishaya shkola [in Russian].
4. Ashby, M. F., Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., & Wadley, H. N. G. (2000). *Metal Foams: A Design Guide*. Elsevier.
5. Finkelstein, A., Husnullin, D., & Borodianskiy, K. (2021). Design and Fabrication of Highly Porous Replicated Aluminum Foam Using Double-Granular Space Holder. *Materials*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/ma14071619>
6. Finkelshteyn, A. B., Kazantsev, I. S., & Yun, I. A. (2006). Fil'truyushchiye svoystva poristogo litogo alyuminiya [Filtering properties of porous cast aluminum]. Moscow: Mashinostroyeniye [in Russian].
7. Surace, R., De Filippis, L. A. C., Ludovico, A. D., & Boghetich, G. (2009). Influence of processing parameters on aluminium foam produced by space holder technique. *Materials & Design*, 30(6), 1878-1885. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.09.027>
8. Furman, E. L., Finkelstein, A. B., & Cherny, M. L. (2013). Permeability of Aluminium Foams Produced by Replication Casting. *Metals*, 3(1), 49-57. <https://doi.org/10.3390/met3010049>
9. Nová, I., Fraňa, K., Solfronk, P., Sobotka, J., Koreček, D., Švec, M. (2021). Characteristics of Porous Aluminium Materials Produced by Pressing Sodium Chloride into Their Melts. *Materials*, 14(17). <https://doi.org/10.3390/ma14174809>
10. Finkelshteyn, A. B. (2010). Teoriya i praktika polucheniya poristyykh otlivok iz alyuminiyevykh splavov propitkoy. [Theory and practice of obtaining porous castings from aluminum alloys by impregnation]. Yekaterinburg, 40 p. [in Russian].
11. Rud', V. D., Povstianoy, O. Yu., Zabolotnyi, O. V., & Boginskiy, L. S. (2016). Tekhnolohiyi, struktura, vlastyvoli porystyykh proniknykh materialiv. Monografiya [Technologies, structure, properties of porous permeable materials. Monograph]. Lutsk: RVV Lutskoho NTU [in Ukrainian].
12. GOST 25283-93. (1993). Materialy spechenyye pronitsaemye. Opredeleniye pronitsaemosti zhidkostey [Sintered permeable materials. Determination of liquid permeability]. Minsk: Interstate Council for Standardization, Metrology, and Certification [in Russian].

Received 20.07.2025

Summary

Ye.H. Byba^{1,2}, PhD (Engin.), Associate Professor, Associate Professor of the Department, e-mail: byba.evgen@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1696-300X>

A.V. Minitskyi¹, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Professor of the Department, e-mail: aminitsky@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5767-4071>

V.V. Kovalenko¹, higher education student, e-mail: vitaly.kovalenko1983@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-9120-6533>

B.V. Kyvhylo¹, graduate student, e-mail: kyvhylo.bohdan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5890-9020>

M.M. Yamshinskij¹, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Department Chair, e-mail: yamshinskiy@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2293-2939>

I.V. Lukianenko¹, PhD (Engin.), Associate Professor, e-mail: lukianenkoiv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1043-9688>

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

²Institute of Applied Control Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

Influence of Particle Size Composition of a Forming Agent on the Structure and Properties of Porous Cast Aluminum

Porous materials made of aluminum powders are attracting attention due to the non-scarcity of raw materials, high corrosion resistance, and low density compared to similar materials based on copper and stainless steel. However, these materials still have not found wide practical applications because of the presence of a non-recoverable aluminum oxide film on the surface of aluminum powder particles, preventing metal contact formation between the particles. Porous cast aluminum can be the solution to all these problems. Porous cast aluminum has better characteristics, making it a promising analog of the proposed porous permeable materials.

The paper analyzes technological parameters of producing porous cast aluminum (PCA) by vacuum impregnation method using NaCl as a foaming agent.

It was found that the particle size of the blowing agent directly affects the porosity: larger particles reduce the contact area and are less densely distributed in the material body. The geometric shape of the particles also has an impact on porosity: irregularly shaped particles have a larger contact area and are more densely packed than spherical particles. It was discovered that NaCl is completely extracted from the samples, the pores have a variety of geometric shapes, and with an increase in the fraction of the pore-forming agent, the pore size increases. The analysis of microstructures showed that with an increase in the fraction of a forming agent, the average pore size and apertures also increase.

The research indicated that the size of a forming agent determines the strength characteristics of the PCA; with an increase in the foaming agent fraction, and the pore size respectively, the strength grows.

It was revealed that the permeability coefficient is sensitive to the pressure drop and goes up significantly with an increase in pore size, which is determined by the particle size composition of the filler. In addition, it was established that the higher the porosity, the higher the permeability coefficient.

The results of the research showed the prospects of using PCA as filter elements operating under conditions of significant pressure drops and aggressive media.

Keywords

Filler, structure, aluminum alloy, compressive strength, pouring temperature, metal mold (coil), pore size and shape, permeability coefficient.