

О. В. Бякова

# Матеріали високопористі

**МАТЕРІАЛИ ВИСОКОПОРИСТІ** – клас надлегких композиційних матеріалів із комірчастою (пористою) структурою, в яких пористість складає понад 50 %. Окрім спінених матеріалів, у яких така структура утворюється внаслідок заморожування рідкої піни, формування М. в. може здійснюватися й ін. шляхом, що не обов'язково містить етап перебування речовини у рідкому стані. Властивості М. в. залежать від характеристик матеріалу, з якого вони виготовлені, заг. пористості  $q$  (віднос. щільності  $p^*/p_s = 1-q$ , де  $p^*$  – щільність пористого матеріалу,  $p_s$  – щільність суціл. матеріалу), топології комірок, а також від їхньої морфології (розміру та форми). Щільність, розмір і топологія комірок суттєво залежать від способу виготовлення М. в. Розрізняють М. в. із замкненими (закрита пористість), незамкненими (відкрита пористість) та частково замкненими (змішаний тип пористості) комірками. Замкнені комірки є типовими для спінених матеріалів, у яких комірчаста структура формується під час тужавіння рідкої піни – суміші рідини з диспергов. газ. бульбашками. М. в. властиве поєднання низької щільності з високою питомою жорсткістю (віднесена до одиниці маси), що неможливе для суціл. матеріалів. М. в. обробляють мех. способом і комбінують з ін. матеріалами звар., клей. або болт. типом з'єднання. М. в. нетоксичні, незаймісті, термо- та біологічно стійкі. Спінені матеріали із замкненими комірками мають теплоізоляц. властивості, проявляють плавучість на воді. М. в. багатофункціональні, адже завдяки комірчастій структурі здатні поглинати різні види енергії: мех., акуст. й електромагнітну. За винятком технол. варіантів, типових для виготовлення спінених матеріалів, усі ін. способи отримання М. в. поєднують у 3 групи за принципами рідин. і порошок. металургій, електрохім. та хім. осаджень. Серед розроблених із залученням принципів рідин. металургії розрізняють способи формування високопористої структури внаслідок газоевтектич. перетворення та способи литва за пористою моделлю або литва у форму з наповнювачем. Спосіб формування комірчастої структури внаслідок газоевтектич. перетворення розроблено в Україні, а потім розвинено у США та Японії. В його основу покладено новий тип газоевтектич. реакцій у насиченому газом розтопі (L). Наслідком газоевтектич. реакції  $L \rightarrow S+G$ , яка за своїми ознаками подібна до звичай. евтектич. реакції, є одночасне утворення з рідини (L) двох ін. фаз: твердої (S) та газової (G). Газоевтектичну рівновагу в зоні т-р топлення знайдено для низки водневих систем Me–H, де Me – Fe, Ni, Mn, Cu, Al, Mg, W, Mo, Ti, Be, Cr, а також бінар. систем за участі ін.

газів Fe-N, Ag-O. Виникненню комірчастої структури внаслідок газоевтектич. реакції сприяє варіація (спільно або порізно) таких термодинаміч. характеристик, як температура (T) та тиск (P). Упорядкована газокристалічна структура з витягнутими в напрямку кристалізації еліпсоїдал. порами формується під дією гравітації в умовах спрямов. відведення тепла. Такий комірчастий матеріал називають газарітом (за способом отримання) або матеріалом із Lotus-структурою. Спосіб дозволяє отримувати матеріал із віднос. щільністю в інтервалі 0,95-0,25 з комірками діаметром 0,01-10,00 мм і довж. 0,1-30,0 мм. Литво за високопористою моделлю передбачає формування комірчастої структури в металі шляхом копіювання структури моделі, яку надалі видаляють. У якості моделі застосовують полімерну піну з відкритою пористістю. Уперше такий підхід до формування комірчастої структури в металі розроблено компанією «ERG» (Окленд, США) і випущено під торг. маркою «Duocel», нині його також застосовують у Японії та Німеччині. На першому етапі з полімер. (переважно поліуретан.) піни з відкритою пористістю готують модель, яку вкладають у форму з піску. На наступ. етапі полімерну піну заповнюють суспензією, що містить достатньо теплостій. матеріал, зокрема муліт, фенол. смолу, карбонат кальцію. Після висихання заготовку нагрівають для піролізу полімер. піни, а отриману пористу матрицю, яка є негатив. відбитком полімер. піни, заповнюють (під деяким тиском) метал. розтопом. Після охолодження матрицю видаляють мех. способом та отримують структуру, яка є відбитком полімер. піни. За допомогою литва за високопористою моделлю виготовляють М. в. на основі Al, Zn, Ni-Cr, Cu, Mg, Fe-C з віднос. щільністю до 0,03-0,60 та розміром незамкнених комірок 1-5 мм. Розроблено та впроваджено спосіб литва розтопу в форму з наповнювачем у вигляді пустотілих сфер або гранул, які видаляють на завершал. етапі. В альтернатив. варіанті наповнювач утоплюють у розтоп. Як наповнювач використовують органічні та неорганічні речовини: гранули вермікуліту, сіль, клей та полімерні кульки, пустотілі скляні кульки та пустотілі сфери з оксиду алюмінію тощо. Для запобігання передчас. кристалізації розтопу під час литва форму з наповнювачем підігрівають. Допоміж. заходом для ефектив. інфільтрації розплаву може слугувати зниження тиску у формі з наповнювачем. Після тужавіння розтопу пустотілі сфери залишають у закристалізов. металі, який набуває комірчастої структури із закритою пористістю. Комірчасті структури з відкритою (або частково відкритою) пористістю формують унаслідок застосування розчин. гранул (напр., солі), які видаляють шляхом промивання у воді, кислотах, лугах та ін. розчинниках. Полімерні кульки видаляють піролізом у процесі відпалу. Спосіб дозволяє отримувати М. в. на основі Al, Zn, Mg, Cu, Pb. Він досить дешевий, з його допомогою виготовляють фасонні зливки з віднос. щільністю до 0,2 та розміром комірок 0,01-10 мм.

Розпиленням рідкого металу (Ospray-процес) формують комірчасту структуру в різних металах і сплавах. Відповідно до цього способу розтоп, що містить в своєму складі речовини, які дисоціюють при нагріванні з виділенням великої кількості газу, або

утворюється внаслідок ін. хім. реакцій, розпилюється і осаджується на підкладку малими краплинками. Отриманий розпилений матеріал після конденсації на підкладці може містити певну кількість оксидів, метастабіл. метал. фаз, йому характерний малий розмір зерен. Напр., пористу бронзу (Cu–6Sn) можна виготовляти шляхом додавання під час розбризкування розплаву порошку  $\text{BaCO}_3$ . Отримання шарів пористої сталі з віднос. щільністю до 0,4 здійснюють шляхом додавання у метал. розтоп  $\text{SiO}_2$  або  $\text{MgO}$ . Газ виділяють за реакцією відновлення, зокрема  $\text{SiO}_2 + 2\text{C} = \text{Si} + 2\text{CO}$ . Спосіб надає можливість формувати пористі структури на різних за формою підкладках, зокрема листах і трубках. Серед способів, в основу яких покладені принципи порошок. металургії, – формування комірчастої структури пресуванням і спіканням волокон, порошоків з наповнювачем; відпал порошок. сумішей з наповнювачем, що видаляють просочуванням емульсіями полімер. моделей, розширенням газу мікропорожнин порошок. заготовок, реакцій. синтезом. Вони особливо важливі для формування комірчастої структури в металах і сплавах, яким властива висока температура топлення (напр., Ti, жароміцні сплави, нержавіючі сталі), а також у матеріалах на основі інтерметалід. сполук. Пресуванням і спіканням порошоків випускають пористі заготовки з Ti, Ni, Cu, бронзи, нержавіючої сталі та ін. з віднос. щільністю не менше 0,5. Застосовуючи екстрагов. метал. волокна (сталі, Ti, Ni, Cu, Al) та волокна інтерметалід. сполук, отримують пресов. заготовки у вигляді полос, листів, стрічок та кілець з віднос. щільністю до 0,2 та комірчастою структурою, подібною до губки. В альтернатив. варіантах метал. порошок змішують з наповнювачами, консолідують холод. або теплим пресуванням і спікають. Як наповнювачі використовують ті самі речовини, що й у рідин. методах. Для виготовлення високопористого Ti додатково застосовують гранульов. Mg або порошок карбаміду. На прикінцев. етапі наповнювач розчиняють або відпалюють, отримуючи комірчасту структуру у вигляді губки з віднос. щільністю до 0,3 та розміром комірок 0,01–10,0 мм. Спосіб виробництва M. v. із застосуванням моделі, що видаляють, є модифікацією способу Duocel і містить просочування полімер. піни водяними емульсіями на основі матрич. порошку, висушування, відпалювання полімер. піни та дифуз. синтез матрич. порошку до утворення суціл. каркаса. Термічне оброблення переважно проводять у вакуумі або атмосфері Н. За допомогою цього способу виготовляють фасонні заготовки (плит, циліндрів, труб тощо) з багатьох метал. матеріалів і аморф. С з отриманням комірчастої структури з відкритою пористістю, віднос. щільністю до 0,3 і розміром комірок від 1 мкм до 5 мм. Отримання пористих структур унаслідок розширення газу в твердому металі здійснюють внаслідок підвищення температури (Т) і зменшення тиску, що спричиняє крип твердого тіла (зокрема титан. сплаву Ti–Al–4V) з формуванням пор. M. v. з комірчастою структурою із застосуванням пустотілих сфер діаметром 0,2–10,0 мм та товщиною стінок 10–100 мкм виготовляють із Cu, сталі, Ni, Ti, інтерметалід. сполук. Сфери консолідують різними в'язучими речовинами (переважно смолами) або покривають оксид. емульсією та спікають. Залежно від способу консолідації сфер отримують M. v. із закритою, відкритою та змішаним типами пористості та відносною щільністю до 0,2. Спосіб дозволяє

виробляти градієнтні та регулярні комірчасті структури у вигляді решітки Браве за воск. моделями. Реакцій. синтез застосовують для формування комірчастої структури в керам. матеріалах (напр., TiB, TiB<sub>2</sub>) та інтерметалід. сполуках (переважно в системі Al–Ni). В основу способу покладений самозапал. синтез (СЗС-процес). Під час формування комірчастої структури в інтерметалідах системи Al–Ni відповідні порошки змішують, пресують до віднос. щільності 0,72, розміщують в реакторі, який дегазують, заповнюють аргоном та нагрівають до т-р горіння суміші. Формування комірчастої структури із замкненими комірками здійснюють внаслідок виділення води під час дегідратації оксигідриду алюмінію (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> × 3H<sub>2</sub>O), присутнього на поверхні алюм. порошку. В результаті оброблення отримують пористий інтерметалід Al<sub>3</sub>Ni з низькою віднос. щільністю (до 0,15). Відносну щільність регулюють домішками TiC і B<sub>4</sub>C, які впливають на теплоту горіння суміші, зменшуючи або збільшуючи пористість матеріалу. В основу способів електрохім. та хім. осадження покладений принцип копіювання комірчастої структури полімер. піни (переважно поліуретанової), яку на прикінцевому етапі видаляють так само, як і в ін. зазначених способах. Цей спосіб переважно застосовують для формування комірчастих структур у Ni та його сплавах з Cr і Cu. Електрохім. осадження метал. Ni здійснюють у парах карбоніл. Ni Ni(CO)<sub>4</sub>, який наносять на поверхню полімер. піни, вкритою шаром матеріалу з високою електропровідністю (переважно на основі C або H). Після синтезуючого відпалу та видалення полімер. моделі отримують М. в. з віднос. щільністю 0,02–0,05 та незамкненими комірками розміром 0,1–3,2 мм. Недоліком процесу є висока токсичність карбоніл. Ni, що вимагає оснащення реакторів засобами захисту й утилізації газ. відходів. Спосіб уживаний у дослідно-пром. виробництві низки закордон. фірм, які постачають комерц. продукт під торг. марками «Retimet» («Dunlop», Велика Британія), «Celmet» («Sumitomo Electric», Японія), «Recemat» («SEAC», Нідерланди), «Incofoam®» (США, Велика Британія, Китай). М. в. використовують в буд-ві, на транспорті, машинобудуванні, аерокосміч. техніці та ін. секторах промисловості. За допомогою М. в. зі змішаним типом пористості (переважно зі стал. пустотілих сфер) полегшують та підвищують захисні властивості кузов. деталей автомобілів, знижують шум і очищують вихлопні гази у конструкції глушників. М. в. із відкритою пористістю на основі Cu та Al використовують у теплообмінниках як елементи та стінки для зупинки вогню, як фільтри для очищення рідини від твердих часток. Із М. в. (переважно на основі сплавів FeCrAlY та кераміки) виготовляють каталіт. фільтри для очищення відпрацьов. пром. газів. М. в. із кераміки (переважно SiC) та вуглецю застосовують для фільтрів, що працюють під впливом агресив. середовищ і високих т-р (напр., фільтри для очищення метал. розтопів), елементів ракет. сопел для фільтрації та охолодження газів. Із високопористого Al із незамкненими комірками виробляють каталіт. матриці в транспорт. засобах, що працюють на водневому паливі, резервуари для збереження газів і рідин в умовах криоген. т-р (напр., у пристроях інфрачервоної оптики), дифузори, що розсікають повітр. потоки, оболонки п'єзоелектр. тунел. мікрофонів, оптичні телескопи супутників для полегшення конструкції та забезпечення стабільності частот. параметрів, опорні елементи дзеркал. поверхні, борт.

резервуари літаків для унеможливлення від небажаного переміщення палива. Досліджено перспективність застосування високопористого Ті та нержавіючої сталі з комірчастою Lotus-структурою для виготовлення протезів і імплантатів.

### **Рекомендована література**

1. L. J. Gibson, M. F. Ashby. Cellular solids: Structure and properties. New York, 1988;
2. M. F. Ashby, A. G. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson et al. Metal foams: A design guide. New Delhi, 2000;
3. J. Banhart. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams // Progress in materials science. 2001. Vol. 46;
4. Бякова А. В. Высокопористые материалы // Неорг. материаловедение. Материалы и технологии. К., 2008. Т. 2, кн. 1;
5. Бякова О. В., Скороход В. В., Юркова О. І. Спінені та високопористі матеріали з комірчастою структурою. К., 2011;
6. J. Banhart. Light-metal foams – history of innovation and technological challenges // Advanced engineering materials. 2013. Vol. 15, № 3.

### **Бібліографічний опис:**

Матеріали високопористі / О. В. Бякова // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. – К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2018. – Режим доступу:

<https://esu.com.ua/article-66955>

2001-2025 © Ця енциклопедична стаття захищена авторським правом згідно з чинним законодавством України ([докладніше](#)).