

## ПЕРКОЛЯЦІЙНИЙ ПІДХІД ДО ОПИСУ МІЖДЕНДРИТНОГО ЖИВЛЕННЯ НА ЗАВЕРШАЛЬНІЙ СТАДІЇ ЗАТВЕРДІННЯ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ

**Анотація.** У статті розглянуто фізичні передумови міждендритного живлення на завершальній стадії затвердіння металів і сплавів. Показано, що ефективність компенсації усадки в межах *tushy zone* визначається не лише наявністю залишкової рідкої фази, а й умовами її транспорту, зокрема проникністю міждендритного простору, локальним тиском і збереженням безперервних шляхів підживлення. Проаналізовано механізми формування усадкової та газоусадкової пористості, вплив зростання частки твердої фази на звуження міждендритних каналів, зниження проникності та локалізацію потоків рідкої фази. Обґрунтовано доцільність застосування перколяційного підходу до опису зв'язності рідкої фази на пізніх стадіях затвердіння. Запропоновано інтерпретувати *tushy zone* як двофазну систему, у якій рідка фаза виконує роль транспортної мережі, а тверда фаза — обмежувального каркаса. Показано, що втрата міждендритного живлення пов'язана не з повним зникненням рідкої фази, а з руйнуванням її глобальної зв'язності та безперервного транспортного шляху. Встановлено, що перколяція рідкої фази може бути використана як критерій втрати живильності та як теоретична основа для подальшого моделювання пористості й дефектоутворення в металевих виливках.

**Ключові слова:** міждендритне живлення; *tushy zone*; перколяція; зв'язність рідкої фази; затвердіння металів і сплавів; усадкова пористість; газоусадкова пористість; проникність; когерентність дендритів; дефектоутворення.

### Вступ

Якість металевих виливків значною мірою визначається умовами завершальної стадії затвердіння, коли у формі виникає двофазна зона *tushy zone*, а залишкова рідка фаза повинна компенсувати об'ємну усадку. У цей період міждендритне живлення є одним із ключових чинників, що впливають на щільність, суцільність і експлуатаційні властивості литого металу [1, 2].

Порушення живлення на пізніх стадіях затвердіння зумовлює формування усадкової та газоусадкової пористості, причому наявність рідкої фази сама по собі ще не гарантує компенсації усадки. Вирішальними стають умови транспортування розплаву, локальний тиск і морфологія міждендритного простору [3, 6–8].

Традиційно втрату живлення в *mushy zone* пов'язують зі зменшенням проникності, зростанням гідродинамічного опору та падінням тиску в рідкій фазі. Однак на завершальній стадії затвердіння цього опису недостатньо, оскільки визначальним чинником стає також просторова зв'язність рідкої фази. За високих часток твердої складової навіть незначні структурні зміни можуть призводити до ізоляції рідких областей і фактичного припинення живлення (рис. 1) [4, 5, 9, 10]. Тому актуальним є підхід, який дозволяє розглядати завершальну стадію затвердіння не лише як фільтрацію розплаву в пористому середовищі, а і як еволюцію зв'язності рідкої мережі в умовах формування когерентного дендритного каркаса. У цьому аспекті перколяційний підхід є перспективним, оскільки дає змогу трактувати втрату міждендритного живлення як наслідок досягнення критичного порога зв'язності рідкої фази [9–12].

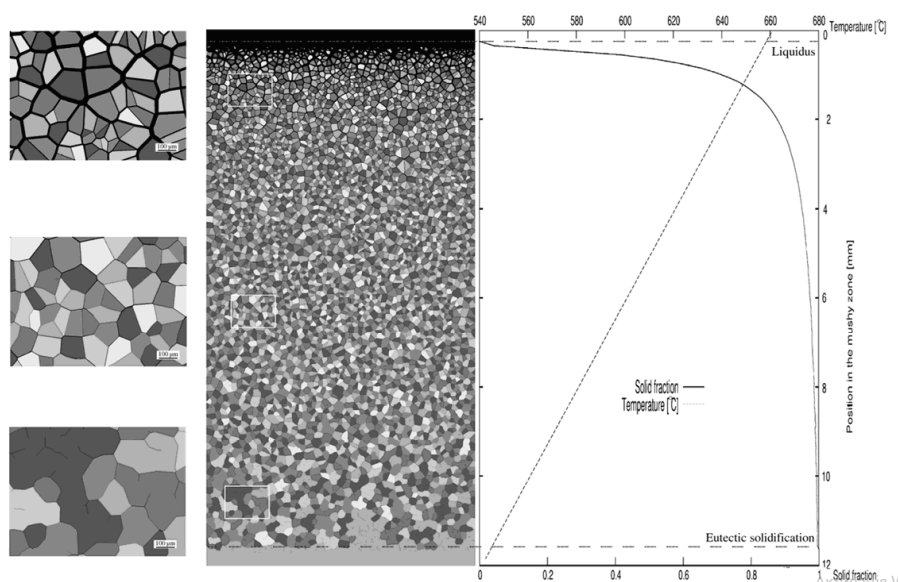


Рисунок 1 – Розрахована *mushy zone* сплаву з глобулярною структурою за температурного градієнта 100 К/см і швидкості охолодження 1 К/с [9]; ліворуч наведено збільшені фрагменти виділених ділянок, праворуч – розподіл об'ємної частки твердої фази в горизонтальних перерізах

Сучасні моделі міждендритного живлення переважно спираються на континуальний опис течії рідкої фази в пористому середовищі. У межах цього напряму сформовано *Darcy-based* моделі, де транспорт розплаву визначається градієнтом тиску, проникністю середовища та в'язкістю рідини [1, 2]. Значну увагу приділено дослідженню проникності *mushy zone*: для колончастих і рівноосних дендритних структур отримано експериментальні та чисельні залежності проникності від частки рідкої фази, морфології дендритів і характерних розмірів мікроструктури [2, 4, 5, 11]. Також розвинено *porous-medium* і трифазні моделі, в яких враховано не лише фільтраційне живлення, а й умови формування пористості за наявності газовиділення та усадки [3].

Разом із тим континуальні підходи переважно оперують усередненими характеристиками і недостатньо враховують топологічні зміни рідкої мережі. На пізніх стадіях затвердіння рідка фаза може ще зберігатися, але вже не утворювати безперервного шляху живлення. Дослідження переходу від безперервних рідких плівок до когерентного твердого стану, а також гранулярні моделі *mushy zone* показали, що у зоні високих часток твердої фази відбуваються локалізація потоків і формування критичних структурних переходів [9, 10]. Це зумовлює доцільність використання перколяційного підходу, в межах якого *mushy zone* розглядається як двофазна система зі змінною зв'язністю рідкої фази, а втрата живлення пов'язується з руйнуванням глобальної мережі рідких каналів [10, 12].

Метою статті є обґрунтування перколяційного підходу до опису міждендритного живлення на завершальній стадії затвердіння металів і сплавів та встановлення ролі зв'язності рідкої фази як визначального чинника збереження живильності *mushy zone*.

Для досягнення поставленої мети необхідно: проаналізувати фізичну природу міждендритного живлення на завершальній стадії затвердіння; розглянути механізми формування усадкової та газоусадкової пористості в умовах обмеженого живлення; узагальнити сучасні підходи до опису течії рідкої фази в *mushy zone*, зокрема *Darcy-based* і *porous-medium* моделі; встановити обмеження континуального опису для високих часток твердої фази; обґрунтувати доцільність інтерпретації *mushy zone* як перколяційної

системи; показати, що втрата зв'язності рідкої фази може бути використана як критерій припинення міждендритного живлення.

### **Фізичні передумови міждендритного живлення на завершальній стадії затвердіння**

**Міждендритне живлення як механізм компенсації усадки.** На завершальній стадії затвердіння металів і сплавів у межах двофазної області *mushy zone* міждендритне живлення забезпечує компенсацію об'ємного скорочення, що супроводжує фазовий перехід із рідкого стану в твердий. У міру формування дендритного каркаса залишкова рідка фаза повинна надходити через систему міждендритних каналів до локальних зон дефіциту об'єму. Отже, ефективність живлення визначається не лише кількістю рідкої фази, а й умовами її фільтраційного транспорту в середовищі зі зростаючим гідродинамічним опором [1], [2]. Збереження живильності можливе за наявності залишкової рідини, достатньої проникності *mushy zone* та безперервних шляхів підживлення [2], [4], [5], [11].

**Проблема усадкової та газоусадкової пористості.** Усадкова пористість виникає тоді, коли рідка фаза вже не може компенсувати локальне об'ємне скорочення металу в процесі затвердіння. За умов недостатнього міждендритного живлення в окремих зонах формуються порожнини усадкового походження, масштаб яких визначається співвідношенням між усадкою, подачею розплаву, проникністю двофазної області та локальним тиском у рідині [3], [6]. Газоусадкова пористість має складніший механізм, оскільки поєднує дефіцит живлення з виділенням розчинених газів із розплаву. За цих умов зменшення доступу рідкої фази до усадкових зон унеможлиблює компенсацію порожнин, а зниження тиску сприяє стабілізації та зростанню газових пор [3], [6]–[8]. Таким чином, усадкова й газоусадкова пористість є безпосереднім наслідком порушення міждендритного живлення.

**Вплив зростання частки твердої фази на проникність *mushy zone*.** Зі збільшенням частки твердої фази геометрія міждендритного простору істотно ускладнюється: канали течії звужуються, стають більш звивистими та неоднорідними. Унаслідок цього проникність *mushy zone* зменшується і перестає визначатися лише об'ємною часткою рідини, оскільки суттєвого

значення набувають морфологія дендритів, їх взаємне розташування та характер розгалуження рідких каналів [2], [4], [5], [11]. За високих часток твердої фази навіть незначне додаткове зростання твердої складової може різко обмежити фільтраційний транспорт рідини [4], [5], [11]. Це означає перехід від режиму множинних шляхів підживлення до режиму локалізації потоку в небагатьох вузьких каналах, що створює передумови для ізоляції окремих рідких ділянок і втрати живильності (рисунок 2) [5], [10], [12].

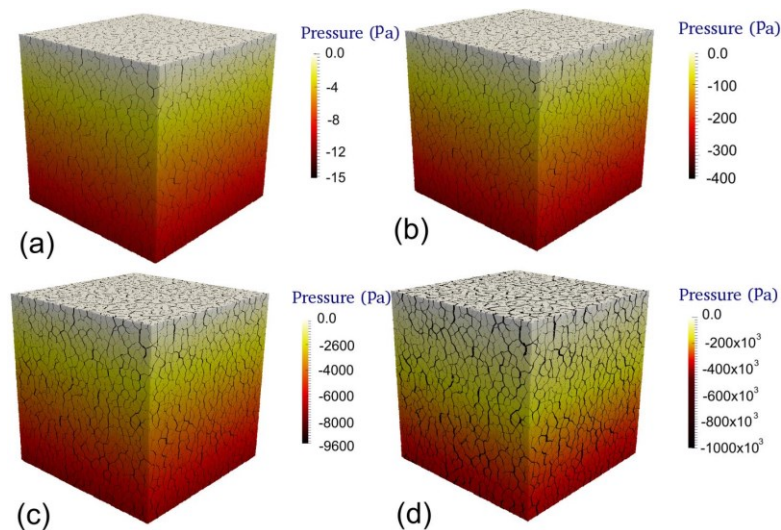


Рисунок 2 – Течія рідкої фази в елементарному об’ємі mushy zone для різних значень частки твердої фази: а)  $g_s = 0.50$ , б)  $g_s = 0.80$ , в)  $g_s = 0.93$ , г)  $g_s = 0.98$ . Ширина каналів пропорційна локальній інтенсивності потоку. [12]

**Падіння локального тиску як умова втрати живлення.** Рушійною силою транспорту рідкої фази в міждендритному просторі є градієнт тиску, який забезпечує переміщення розплаву до зон усадки [1], [2]. Зі зменшенням проникності mushy zone для підтримання того самого потоку потрібен більший перепад тиску, що підвищує ймовірність виникнення локальних зон недостатнього живлення [1], [2], [11]. На завершальній стадії затвердіння втрати тиску мають виразно локальний характер: у вузьких і звивистих міждендритних каналах вони посилюються, а частина рідкої фази може ставати фактично гідродинамічно ізолюваною. У межах трифазних моделей це безпосередньо пов’язується з формуванням пористості, оскільки падіння локального тиску одночасно перешкоджає компенсації усадки та сприяє виділенню газової фази [3], [6]. Тому дефектоутворення на пізніх стадіях

затвердіння доцільно розглядати як наслідок поєднаної дії деградації транспортної мережі й критичного зниження локального тиску в рідині [3], [6].

**Точка когерентності дендритів і перехід до обмеженого живлення.** Ключовим етапом еволюції mushy zone є досягнення точки когерентності дендритів, коли тверда фаза вперше формує просторово зв'язний каркас. До цього моменту рідка фаза займає відносно безперервний об'єм і забезпечує порівняно вільний перерозподіл розплаву. Після формування когерентного твердого каркаса рідина зберігається переважно у вигляді тонких каналів і плівок, обмежених дендритною структурою, а її транспортні можливості різко знижуються [9], [10]. Дослідження переходу від безперервних рідких плівок до когерентного твердого стану, а також гранулярні моделі рівноосних mushy zone показали, що саме поблизу когерентності починається перехід від відносно вільного до обмеженого живлення [9], [10]. У цій області спостерігаються локалізація потоків у небагатьох збережених каналах, підвищення чутливості системи до перекриття рідких шляхів і швидке наближення до стану втрати живильності [9], [10], [12]. Отже, точку когерентності слід розглядати як фізичну межу, після якої ризик утворення усадкових і газоусадкових дефектів істотно зростає.

#### **Перколяційний підхід до опису зв'язності рідкої фази**

**Основні положення теорії перколяції.** Теорія перколяції є фундаментальним підходом статистичної фізики для опису появи або втрати глобальної зв'язності в невпорядкованих дискретних системах [13]–[15]. У її межах система розглядається як сукупність відкритих і закритих елементів, а сукупність взаємопов'язаних відкритих елементів формує перколяційний кластер. Якщо такий кластер охоплює систему від одного граничного боку до іншого, виникає глобальна зв'язність, що забезпечує макроскопічний транспорт. Ключовим поняттям є поріг перколяції – критичне значення частки провідної фази, при якому система переходить від локальних ізольованих кластерів до безперервної мережі. Поблизу цього порога навіть незначні структурні зміни можуть спричинити якісну зміну транспортних властивостей середовища [13], [14].

**Порогова поведінка зв'язності поблизу критичного стану.** У критичній області система втрачає надлишковість транспортних шляхів, а

перенесення концентрується в обмеженій кількості каналів, що формують каркас перколяційного кластера [13]–[15]. Руйнування навіть невеликої частини таких зв’язків може призвести до розпаду безперервного шляху на ізольовані фрагменти. Для двофазних систем це означає, що провідна фаза може ще зберігатися в помітному об’ємі, але вже не брати участі в реальному транспорті, якщо її мережа втрачає наскрізну зв’язність [14], [15]. Саме перехід до ізольованих рідких областей є характерною ознакою втрати перколяції на завершальній стадії затвердіння (рисунок 3) [9], [10], [12].

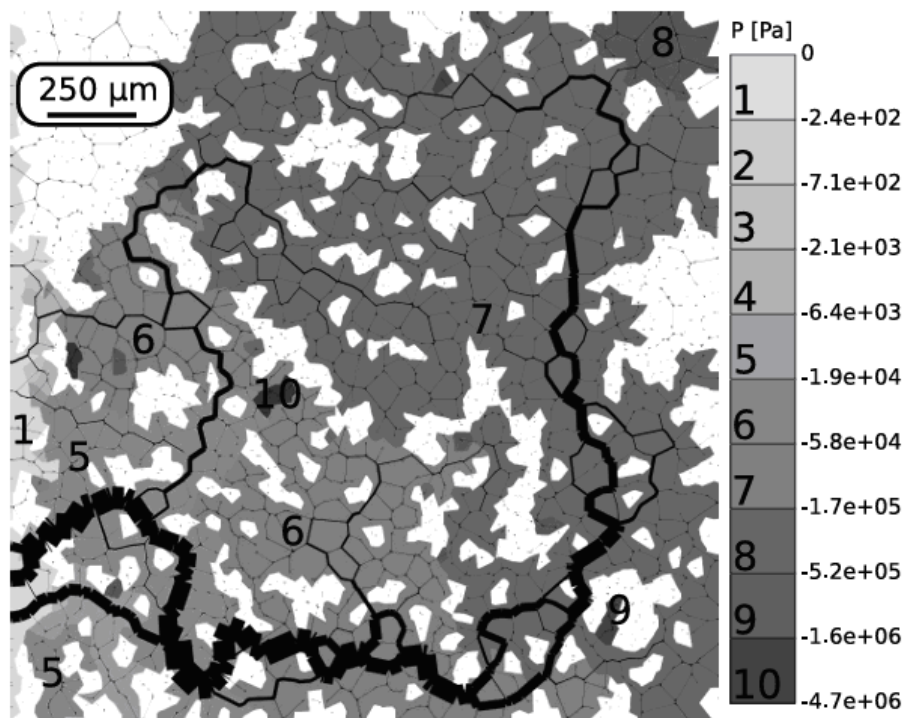


Рисунок 3 – Профіль тиску та потік рідкої фази, зумовлений усадкою, в елементі mushy zone при високій частці твердої фази; товщина каналів пропорційна локальному потоку, а градація тону відповідає локальному тиску. Рисунок ілюструє локалізацію живлення та значний перепад тиску вздовж основного шляху підживлення [10]

**Інтерпретація *mushy zone* як двофазної перколяційної системи.** На завершальній стадії затвердіння *mushy zone* доцільно розглядати як двофазну систему, в якій рідка фаза утворює транспортну мережу, а тверда фаза формує обмежувальний каркас [9], [10], [12]. На ранніх стадіях рідка фаза займає значну частину міждендритного простору й утворює відносно безперервну систему

каналів і плівок. У міру зростання частки твердої фази дендритні елементи зближуються, контактують між собою та формують когерентну структуру, що змінює топологію рідкої мережі [9], [10]. За такого підходу рідка фаза трактується не лише як залишковий розплав, а як система транспортних зв'язків, через яку реалізується міждендритне живлення [2], [5], [9], [10].

**Зв'язний рідкий каркас як умова реального транспорту.** Міждендритне живлення можливе лише за наявності безперервного рідкого шляху між джерелом живлення та локальною зоною дефіциту об'єму [1], [2], [10], [12]. Сам факт існування залишкової рідини ще не означає збереження транспортної функції, якщо рідка фаза розпадається на ізольовані кишені або непов'язані фрагменти. Отже, транспортні можливості *mushy zone* визначаються не лише об'ємною часткою рідкої фази, а передусім її топологічною цілісністю [10], [12], [15]. Гранулярні та тривимірні моделі показують, що поблизу завершення затвердіння рідка фаза локалізується в міжзернових каналах, а живлення концентрується в небагатьох збережених шляхах [10], [12]. Утрата зв'язності цих шляхів призводить до ізоляції локальних ділянок і створює передумови для неможливості компенсації усадки [9], [10], [12].

**Перколяція рідкої фази як критерій живильності.** У контексті завершальної стадії затвердіння перколяція рідкої фази може бути розглянута як фізично обґрунтований критерій живильності *mushy zone*. Якщо рідка фаза формує глобально зв'язний кластер, міждендритне живлення ще можливе, хоча й за зростаючого гідродинамічного опору. Якщо ж цей кластер руйнується, система втрачає здатність до макроскопічного перенесення розплаву, а отже — і до компенсації усадки [9], [10], [12], [14]. Отже, межею припинення живлення є не повне зникнення рідкої фази, а втрата її глобальної зв'язності [10], [12], [14], [15]. Такий критерій дозволяє розрізняти геометричну наявність рідини та її ефективну транспортну функцію, що є принциповим для опису переходу до дефектоутворення [9], [10], [12].

**Зв'язок перколяції з локалізацією шляхів живлення на пізній стадії затвердіння.** На пізній стадії затвердіння звуження міждендритних каналів, зростання частки твердої фази та формування когерентного каркаса спричиняють локалізацію живлення в окремих вузьких шляхах [5], [9], [10], [12].

Це є характерною ознакою наближення системи до порога перколяції: рідка мережа втрачає надлишковість, а транспорт відбувається лише по незначній кількості критично важливих каналів [10], [12], [14]. Їх руйнування або перекриття призводить до ізоляції окремих зон вилівка від джерел живлення. Саме в цих ділянках виникають умови для локального падіння тиску, втрати живильності та зародження усадкової або газоусадкової пористості [3], [6], [10], [12]. Тому перколяційний підхід доцільно розглядати як теоретичну основу для інтерпретації переходу від структурної перебудови рідкої мережі до дефектоутворення.

### **Обговорення результатів**

**Теоретичне значення перколяційного підходу.** Перколяційний підхід має важливе теоретичне значення для опису міждендритного живлення на завершальній стадії затвердіння, оскільки дозволяє перейти від усередненого опису *mushy zone* до аналізу топології рідкої мережі. На відміну від континуальних моделей, де ключовими параметрами є проникність, тиск і частка рідкої фази, у цьому підході визначальним чинником виступає зв'язність рідкої фази [2], [13]–[15]. Це дає змогу трактувати втрату живильності не лише як наслідок зниження проникності, а як структурний перехід до стану руйнування глобального транспортного шляху [9], [10], [12].

Новизна такого підходу полягає в тому, що він розмежовує наявність рідкої фази та її здатність забезпечувати підживлення. Система може містити залишковий розплав, але вже не бути живильною через втрату наскрізного зв'язного кластера [9], [10]. Порівняно з континуальними моделями перколяційний підхід краще пояснює локалізацію потоків у зоні високих часток твердої фази та пов'язує морфологічну еволюцію дендритного каркаса з переходом до усадкового і газоусадкового дефектоутворення [3], [6], [10], [12]. Отже, він є перспективною теоретичною основою для подальшого розвитку моделей затвердіння і пористості [10], [12], [14].

**Обмеження підходу.** Перколяційний підхід має низку обмежень, пов'язаних передусім зі спрощенням реальної *mushy zone*, яка є багатофізичною та багатомасштабною системою. У межах перколяційної інтерпретації складна структура двофазної області зводиться до схеми зв'язних

і незв’язних елементів, що не відображає повною мірою різноманіття реальних мікроструктурних станів [13]–[15].

Крім того, такий опис не враховує в повному обсязі тривимірну геометрію міждендритного простору, зокрема звивистість, анізотропію та локальні особливості рідких каналів [5], [9], [12]. Тому його доцільно поєднувати з мікроструктурними моделями, здатними відтворювати еволюцію дендритного каркаса та геометрію міжзернових каналів [9], [10], [12]. Важливим залишається і питання експериментальної верифікації: для практичного використання необхідно встановити кількісний зв’язок між перколяційними критеріями та реальними умовами втрати живильності в конкретних сплавах [4], [5], [8], [12]. Отже, обмеження підходу не зменшують його концептуальної цінності, але визначають напрями його подальшого розвитку [10], [12], [14].

**Перспективи подальших досліджень.** Перспективним напрямом є інтеграція перколяційного підходу з методами *cellular automata*, що дозволить простежувати формування критичного стану системи в процесі еволюції дендритної мікроструктури [9], [10], [12]. Це дасть змогу безпосередньо пов’язати втрату зв’язності рідкої фази з локальними особливостями росту зерен і руйнуванням рідких каналів.

Іншим важливим напрямом є поєднання перколяційної інтерпретації з тепловими та гідродинамічними моделями, де одночасно враховуються температура, частка твердої фази, проникність, тиск і швидкість течії рідкої фази [2], [3], [11]. Особливий інтерес становить використання такого підходу для прогнозування пористості: встановлення кількісного зв’язку між втратою глобальної зв’язності рідкої фази, падінням локального тиску та зародженням пор дасть змогу застосовувати перколяційний критерій для ідентифікації дефектонебезпечних зон у виливках [3], [6], [7], [12]. Таким чином, подальші дослідження доцільно спрямувати на поєднання перколяційного аналізу з мікроструктурним, тепловим і гідродинамічним моделюванням, а також на розроблення кількісних схем прогнозування пористості [9], [10], [12], [14].

**Практичне значення роботи** полягає в тому, що перколяційний підхід до опису міждендритного живлення може бути використаний для подальшого розвитку моделей прогнозування усадкової та газоусадкової пористості, а

також для виявлення умов втрати живильності на завершальній стадії затвердіння металів і сплавів.

### Висновки

У роботі узагальнено фізичні передумови міждендритного живлення на завершальній стадії затвердіння металів і сплавів. Показано, що ефективність компенсації усадки визначається не лише наявністю залишкової рідкої фази, а й умовами її транспорту в межах *mushy zone*. Зі зростанням частки твердої фази відбуваються звуження міждендритних каналів, зменшення проникності, локалізація шляхів живлення та посилення локальних втрат тиску, що створює умови для формування усадкової та газоусадкової пористості.

Обґрунтовано доцільність використання перколяційного підходу для опису структурної еволюції рідкої фази на пізніх стадіях затвердіння. Показано, що межею припинення міждендритного живлення є не повне зникнення рідкої фази, а втрата її глобальної зв'язності та руйнування безперервного транспортного шляху.

Отримані результати підтверджують доцільність перколяційного підходу для подальшого моделювання процесів затвердіння та дефектоутворення, а також для розроблення критеріїв прогнозування дефектонебезпечних зон у виливках.

### REFERENCES

1. Mehrabian, R., Keane, M., & Flemings, M. C. (1970). Interdendritic fluid flow and macrosegregation; influence of gravity. *Metallurgical Transactions*, 1(5), 1209–1220. <https://doi.org/10.1007/BF02900233>
2. Poirier, D. R. (1987). Permeability for flow of interdendritic liquid in columnar-dendritic alloys. *Metallurgical Transactions B*, 18(1), 245–255. <https://doi.org/10.1007/BF02658450>
3. Kuznetsov, A. V., & Vafai, K. (1995). Development and investigation of three-phase model of the mushy zone for analysis of porosity formation in solidifying castings. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38(14), 2557–2567. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00012-X](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00012-X)
4. Nielsen, Ø., Arnberg, L., Mo, A., & Thevik, H. J. (1999). Experimental determination of mushy zone permeability in aluminum-copper alloys with equiaxed microstructures. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 30(9), 2455–2462. <https://doi.org/10.1007/s11661-999-0254-y>
5. Brown, S. G. R., Spittle, J. A., Jarvis, D. J., & Walden-Bevan, R. (2002). Numerical determination of liquid flow permeabilities for equiaxed dendritic structures. *Acta Materialia*, 50(6), 1559–1569. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00014-9](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00014-9)

6. Sigworth, G. K., & Wang, C. (1993). Mechanisms of porosity formation during solidification: A theoretical analysis. *Metallurgical Transactions B*, 24(2), 349–364. <https://doi.org/10.1007/BF02659138>
7. Lee, P. D., & Hunt, J. D. (1997). Measuring the nucleation of hydrogen porosity during the solidification of aluminium-copper alloys. *Scripta Materialia*, 36(4), 399–404. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(96\)00411-3](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(96)00411-3)
8. Lee, P. D., & Hunt, J. D. (1997). Hydrogen porosity in directional solidified aluminium-copper alloys: In situ observation. *Acta Materialia*, 45(10), 4155–4169. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(97\)00081-5](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(97)00081-5)
9. Vernède, S., & Rappaz, M. (2006). Transition of the mushy zone from continuous liquid films to a coherent solid. *Philosophical Magazine*, 86(24), 3779–3794. <https://doi.org/10.1080/14786430500228705>
10. Vernède, S., Jarry, P., & Rappaz, M. (2006). A granular model of equiaxed mushy zones: Formation of a coherent solid and localization of feeding. *Acta Materialia*, 54(15), 4023–4034. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.04.035>
11. Han, Q., Viswanathan, S., & Duncan, A. J. (2003). Permeability measurements of the flow of interdendritic liquid in equiaxed aluminum-silicon alloys. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 34(1), 25–28. <https://doi.org/10.1007/s11663-003-0051-8>
12. Sistaninia, M., Phillion, A. B., Drezet, J.-M., & Rappaz, M. (2012). Three-dimensional granular model of semi-solid metallic alloys undergoing solidification: Fluid flow and localization of feeding. *Acta Materialia*, 60(9), 3902–3911. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.03.036>
13. Kirkpatrick, S. (1973). Percolation and conduction. *Reviews of Modern Physics*, 45(4), 574–588. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.45.574>
14. Hunt, A. G. (2001). Applications of percolation theory to porous media with distributed local conductances. *Advances in Water Resources*, 24(3–4), 279–307. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(00\)00058-0](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(00)00058-0)
15. King, P., & Masihi, M. (2009). Percolation in porous media. In R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of complexity and systems science* (pp. 6565–6579). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-30440-3\\_389](https://doi.org/10.1007/978-0-387-30440-3_389)

Received 19.03.2026.

Accepted 18.04.2026.

Published 30.04.2026

UDC 004.94:621.74:669.017

Tatjana Selivyorstova

## PERCOLATION APPROACH TO THE DESCRIPTION OF INTERDENDRITIC FEEDING AT THE FINAL STAGE OF SOLIDIFICATION OF METALS AND ALLOYS

**Abstract.** *The paper examines the physical foundations of interdendritic feeding during the final stage of solidification of metals and alloys. It is shown that the efficiency of shrinkage compensation within the mushy zone is determined not only by the presence of residual liquid phase, but also by the conditions of its transport through the interdendritic space. Particular attention is paid to the role of permeability, local pressure gradients, morphology of liquid channels, and preservation of continuous feeding paths in ensuring the transport capacity of the liquid phase. The mechanisms of*

*shrinkage and gas-shrinkage porosity formation are analyzed, and it is emphasized that the appearance of such defects is directly related to the degradation of the liquid feeding network at high solid fractions.*

*The study summarizes the influence of increasing solid fraction on the narrowing of interdendritic channels, reduction in permeability, localization of liquid flow, and growth of local hydraulic resistance. It is shown that, as the dendritic skeleton evolves toward a coherent solid framework, the liquid phase gradually loses its ability to form a continuous transport network. Under such conditions, even if some amount of liquid remains in the mushy zone, it may no longer participate in real feeding because of topological isolation. This circumstance indicates the limitations of conventional continuum approaches, which mainly operate with averaged characteristics such as permeability, pressure, or liquid fraction, but do not fully capture the structural transformation of the liquid network at the final stage of solidification.*

*To overcome these limitations, the applicability of the percolation approach is substantiated. Within this interpretation, the mushy zone is considered as a two-phase system in which the liquid phase acts as a transport network and the solid phase forms a constraining framework. It is argued that the loss of interdendritic feeding should be associated not with the complete disappearance of the liquid phase, but with the destruction of its global connectivity and the disappearance of a continuous feeding path. Thus, liquid-phase percolation is proposed as a physically meaningful criterion for feeding loss in the mushy zone. The obtained results confirm that the percolation-based interpretation provides a promising theoretical framework for further modeling of solidification processes, localization of feeding paths, and prediction of shrinkage-related defect formation in metallic castings.*

**Keywords:** *interdendritic feeding; mushy zone; percolation; liquid-phase connectivity; solidification of metals and alloys; shrinkage porosity; gas-shrinkage porosity; permeability; dendrite coherency; defect formation.*

**Селівьорстова Тетяна Віталіївна**, кандидат технічних наук, доцент, Кафедра інформаційних технологій і систем, Український державний університет науки і технологій. <https://orcid.org/0000-0002-2470-6986>

**Selivyorstova Tatjana**, candidate of technical science, assistant professor, Department of information technology and systems, Ukrainian state university of science and technologies. <https://orcid.org/0000-0002-2470-6986>