

ІНТЕГРОВАНІЙ ПЕРКОЛЯЦІЙНИЙ ПІДХІД ДО МОДЕЛЮВАННЯ МІЖДЕНДРИТНОГО ЖИВЛЕННЯ В УМОВАХ ЗАТВЕРДІННЯ ПІД ТИСКОМ

Селівьорстова Т.В. [ORCID]

Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна

Анотація. У роботі розглянуто проблему міждендритного живлення на завершальній стадії затвердіння металів і сплавів в умовах зовнішнього тиску. Показано, що традиційні підходи до моделювання, які ґрунтуються лише на локальних параметрах рідкої фази та проникності mushy-зони, не повною мірою враховують втрату глобальної зв'язності рідинної мережі, що є критично важливим для опису дефектоутворення. Запропоновано інтегровану перколяційну модель міждендритного живлення, яка поєднує мікроструктурний опис дендритного каркаса, гідродинамічний підхід до фільтрації рідкої фази в пористому середовищі та перколяційний критерій збереження безперервного каналу живлення. Обґрунтовано, що саме втрата зв'язності рідинної мережі є одним із ключових механізмів переходу від ефективного підживлення до формування усадкової та газоусадкової пористості. Врахування зовнішнього тиску в межах моделі дає змогу точніше описати умови збереження міждендритного живлення та оцінити його вплив на завершальну стадію затвердіння. Запропонований підхід може бути використаний як теоретична основа для подальшого математичного моделювання дефектоутворення в литих металах і сплавах.

Ключові слова: міждендритне живлення, mushy-зона, перколяція, затвердіння під тиском, дендритна структура, проникність, пористість, математичне моделювання.

Вступ. На завершальній стадії затвердіння металів і сплавів у двофазній mushy-зоні рідка фаза фільтрується крізь дендритний каркас і забезпечує компенсацію об'ємної усадки. Порушення цього механізму призводить до формування усадкової пористості, газоусадкових дефектів і гарячих тріщин. У класичних роботах mushy-зона описується як двофазне пористе середовище, для якого визначальними є процеси масо-, тепло- та імпульсоперенесення [1]. Разом із тим на пізніх стадіях кристалізації важливими є не лише локальний вміст рідкої фази та проникність, а й збереження глобальної зв'язності рідинної мережі, через яку передається тиск і здійснюється міждендритне живлення [2], [3].

Постановка проблеми. Існуючі підходи до моделювання здебільшого описують окремі сторони процесу. Darcy-based і porous-medium моделі добре відтворюють загальні умови живлення та падіння тиску в рідкій фазі, але використовують ефективні параметри проникності без явного врахування втрати зв'язності рідинних каналів [1], [4]. Клітинно-автоматні моделі детально описують формування дендритної мікроструктури, однак не завжди прямо пов'язують її з гідродинамікою живлення. Тому актуальною є задача побудови інтегрованої моделі, яка б поєднувала формування структури, зміну проникності, перколяційний розпад рідинної мережі та вплив зовнішнього тиску [1], [2], [5].

Огляд літератури. Фундаментом макроскопічного опису міждендритного живлення є volume-averaged модель Ni та Beckermann [1]. Для аналізу дефектоутворення важливим став критерій Rappaz–Drezet–Gremaud, який пов'язує появу гарячих тріщин із нестачею рідинного підживлення та зниженням тиску в міждендритних каналах [2]. Його подальша експериментальна перевірка підтвердила придатність такого підходу для опису критичних станів затвердіння [3]. Дослідження проникності mushy-зони показують, що вона є ключовою характеристикою дендритного каркаса і визначає здатність системи до живлення [4]. У свою чергу granular/network моделі демонструють, що на фінальній стадії кристалізації вирішальну роль відіграє локалізація потоку та втрата зв'язності рідинної мережі [5].

Дослідження. У роботі запропоновано інтегровану перколяційну модель міждендритного живлення, яка поєднує мікроструктурний, гідродинамічний і топологічний рівні опису. На першому рівні враховується еволюція дендритної структури та частки твердої фази. На другому – рух рідкої фази в mushy-зоні розглядається як фільтрація у пористому середовищі. На третьому – оцінюється збереження або втрата глобальної зв'язності рідинної мережі, яка визначає можливість передачі тиску та підживлення дефіцитних зон [1], [4], [5]. Зовнішній тиск у моделі розглядається як технологічний фактор, що змінює умови живлення і може впливати на морфологію структури.

Аналіз та результати. Аналіз літературних джерел і запропонованої постановки показує, що перехід від ефективного міждендритного живлення до дефектоутворення пов'язаний не лише зі зменшенням частки рідкої фази, а насамперед із втратою безперервного каналу передачі тиску через mushy-зону. Це дає підстави трактувати завершальну стадію затвердіння як перколяційний перехід: доки існує зв'язний рідинний кластер, живлення можливе; після його руйнування навіть наявність ізольованих рідинних включень уже не забезпечує компенсації усадки [2], [5]. Таким чином, запропонований підхід узгоджує класичні porous-medium моделі з перколяційним критерієм втрати зв'язності рідинної мережі.

Висновки. Запропоновано інтегровану перколяційну модель міждендритного живлення в умовах затвердіння металів і сплавів під тиском. Показано, що ключовим механізмом переходу до дефектоутворення є втрата глобальної зв'язності рідинної мережі в mushy-зоні. На відміну від традиційних підходів, модель враховує не лише локальні параметри рідкої фази, а й топологічний стан системи живлення, що робить її більш придатною для теоретичного опису завершальної стадії затвердіння [1], [2], [5].

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження доцільно спрямувати на уточнення зв'язку між параметрами мікроструктури та проникністю mushy-зони, побудову кількісного перколяційного критерію для різних типів структури, а також на розширення моделі з урахуванням газової фази, капілярних ефектів і термодинаміки зародження пор [2], [4], [5].

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Ni J., Beckermann C. A volume-averaged two-phase model for transport phenomena during solidification. Metallurgical Transactions B. 1991. Vol. 22, No. 3. P. 349–361. DOI: 10.1007/BF02651234.
2. Rappaz M., Drezet J.-M., Gremaud M. A new hot-tearing criterion. Metallurgical and Materials Transactions A. 1999. Vol. 30, No. 2. P. 449–455. DOI: 10.1007/s11661-999-0334-z.
3. Drezet J.-M. Validation of a new hot tearing criterion using the ring mould test. Journal de Physique IV France. 1999. Vol. 9. P. Pr9-53–Pr9-62. DOI: 10.1051/jp4:1999906.
4. Erdmann R. G., Poirier D. R., Hendrick A. G. Permeability in the mushy zone. In: Solidification and Gravity V. Materials Science Forum. 2010. Vol. 649. P. 399–408. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.649.399.

5. Sistaninia M., Phillion A. B., Drezet J.-M., Rappaz M. Three-dimensional granular model of semi-solid metallic alloys undergoing solidification: Fluid flow and localization of feeding. *Acta Materialia*. 2012. Vol. 60, No. 9. P. 3902–3911. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.03.036.

**INTEGRATED PERCOLATION-BASED APPROACH TO MODELING
INTERDENDRITIC FEEDING UNDER PRESSURIZED SOLIDIFICATION**

Tetiana Selivorstova

Abstract. *The paper addresses the problem of interdendritic feeding at the final stage of solidification of metals and alloys under external pressure. It is shown that conventional modeling approaches based only on local liquid-phase parameters and mushy-zone permeability do not fully account for the loss of global connectivity of the liquid network, which is critically important for describing defect formation. An integrated percolation-based model of interdendritic feeding is proposed, combining a microstructural description of the dendritic skeleton, a hydrodynamic approach to liquid-phase filtration in a porous medium, and a percolation criterion for preserving a continuous feeding channel. It is substantiated that the loss of connectivity of the liquid network is one of the key mechanisms governing the transition from effective feeding to the formation of shrinkage and gas-shrinkage porosity. Considering external pressure within the model makes it possible to describe more accurately the conditions for preserving interdendritic feeding and to assess its influence on the final stage of solidification. The proposed approach can be used as a theoretical basis for further mathematical modeling of defect formation in cast metals and alloys.*

Keywords: *interdendritic feeding, mushy zone, percolation, pressurized solidification, dendritic structure, permeability, porosity, mathematical modeling.*