

УДК 621.7.01  
М 74

# АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕОРИЙ, ОПИСЫВАЮЩИХ ПРОЦЕССЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

А. А. Мочалов, проф., д-р техн. наук,  
Н. А. Шаповал, аспирант

*Национальный университет кораблестроения, г. Николаев*

**Аннотация.** Проанализированы существующие теории кристаллизации и способы отвода теплоты фазового перехода. Предложен новый способ отвода теплоты фазового перехода за счет организации объемной кристаллизации в кристаллизаторе непрерывного слитка.

**Ключевые слова:** кристаллизация, микрохолодильники, ликвация примесей, фазовый переход, объемная кристаллизация, кристаллизатор, непрерывный слиток.

**Анотація.** Проаналізовано аналіз існуючі теорії кристалізації та способи відведення теплоти фазового переходу. Запропоновано новий спосіб відведення теплоти фазового переходу за рахунок організації об'ємної кристалізації у кристалізаторі неперервного злитка.

**Ключові слова:** кристалізація, мікрохолодильники, ліквация домішків, фазовий перехід, об'ємна кристалізація, кристалізатор, неперервний злиток

**Abstract.** Having analyzed the existing theories of crystallization and heat elimination methods of the phase change the new heat elimination method of the phase change at the expense of the volumetric crystallization organization in the continuous casting crystallizer is suggested.

**Keywords:** crystallization, microrefrigerators, admixture liquation, change of phase, axonometric crystallization, crystallizer, continuous casting

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Прогресс в изучении свойств литых сплавов в последние десятилетия характеризуется прежде всего более широким развитием физических представлений о сложных явлениях формирования сплавов и созданием на их основе новых методов передела и обработки металлических материалов. Существует множество теорий кристаллизации, с использованием которых созданы математические модели процессов, протекающих при кристаллизации металла. Применение одних моделей в технологическом процессе приводит к большой несогласованности установок, других — к термическому растрескиванию поверхности металла, ухудшая качество слитка.

Поэтому была поставлена цель: проанализировать теории, на базе которых разработаны математические модели процесса кристаллизации металлов, и наметить пути дальнейшего совершенствования процесса непрерывной разливки стали, позволяющих улучшить качество непрерывного слитка, увеличить скорость разливки (вытягивание непрерывного слитка), для возможности совмещения ее с непрерывным прокатом стали.

## ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Улучшение качества слитка и увеличение скорости разливки дают возможность экономить тепловую энергию за счет совме-

щения непрерывной разливки с прокатом, отпадает необходимость нагрева непрерывного слитка с целью выравнивания температуры по его сечению, так как организация объемной кристаллизации непрерывного слитка позволяет обеспечить равномерное распределение температуры.

Затвердевание непрерывного слитка осуществляется в кристаллизаторе и в зоне вторичного охлаждения. Для его анализа применяются различные методы исследования: аналитический, численное моделирование на современных компьютерах и гидроинтеграторах, экспериментальный.

Наиболее доступным и экономичным в настоящее время является аналитический метод исследования процесса кристаллизации непрерывного слитка. Он несет наибольшую информацию о процессах, протекающих в нем при минимальных материальных затратах.

И. Гиббс разработал термодинамическую теорию фазовых равновесий и основные принципы статической физики. Используя его работы, М. Фольмер создал общую теорию кристаллизации, которая получила дальнейшее развитие в трудах Я. И. Френкеля [54]. Эта теория нашла подтверждение в работах В. И. Данилова [16], В. Д. Кузнецова [33], А. Н. Колмагорова [32], И. С. Миркина [37], Я. В. Гречаного [15], Б. Чалмарса [58], К. А. Джаксона [18], Р. Кана [26], Д. Е. Овсиенко [2], Н. Н. Сироты [50], У. Вейнгарда [12].

Общая теория кристаллизации выделяет три параметра металлов и сплавов, которые оказывают существенное влияние на процесс роста кристаллов. Это — температура начала кристаллизации (для сплавов интервал метастабильности), скорость зарождения центров кристаллизации и скорости роста кристаллов в переохлажденном расплаве.

В настоящее время существует много различных теорий кристаллизации отливок, которые были созданы советскими и зарубежными учеными: В.И. Даниловым [16], Г.П. Иванцовым [24], Д.Д. Саратовкиным [49], Дж. Уолкером [53], В.И. Добаткиным [20], В.О. Голен-Торном [13], Н.И. Хворино-

вым [55], Б. Чалмерсом [58], Д.К. Черновым [59] и др. Все эти теории детально изложены в монографии Г.Ф. Баландина [6].

Анализ теорий кристаллизации отливок показывает, что все они одинаково хорошо согласуются между собой при объяснении отдельных сторон процесса кристаллизации отливок и слитков. Серьезные разногласия обнаруживаются при попытках теорий объяснить причины прекращения роста столбчатых кристаллов в реальных условиях литья.

Анализируя упрощенные математические модели процесса затвердевания непрерывного слитка, можно сделать заключение, что наиболее распространенной является модель с вырожденной двухфазной зоной. Согласно этой идее, двухфазная зона заменяется гладкой изотермической поверхностью с сосредоточенным источником тепла, температура которой соответствует изотерме, лежащей между температурой ликвидус и солидус. При этом считается, что к моменту достижения этой температуры выделилось 60% теплоты кристаллизации. Такой подход дает возможность использовать классическую математическую модель Стефана [38].

В работах [1, 7, 13, 21, 23, 38, 44] математические модели, использующиеся для анализа процесса кристаллизации расплава, включают в себя дифференциальные уравнения теплового и материального баланса. При этом задаются функцией распределения температур в затвердевшем металле, удовлетворяющей начальным и граничным условиям. Весь процесс кристаллизации непрерывного слитка разбивается на зоны: течение металла, отвод тепла перегрева, затвердевание слитка и охлаждение его после затвердевания.

В настоящее время аналитическое решение задач с движущейся границей раздела фаз, возникающих при кристаллизации металлов, возможно только для небольшого класса задач с соответствующими начальными и граничными условиями.

Трудности аналитического и практические потребности в большей точности приводят к необходимости искать новые методы аналитического решения нелинейных уравнений тепло- и массообмена.

В своих трудах [61, 62] И. Талмон разработал метод для решения задач (типа Стефана) одномерного распространения тепла в плоских слоях. Метод заключается в расчете перемещения изотерм со временем в однородном теле. Математическая модель, описывающая метод решения задач данного класса, включает в себя уравнения теплопроводности для однородной среды, уравнение теплового баланса на границе фазового перехода, начальные и граничные условия. Время полного затвердевания плоской пластины определяется по пересечению фронтом кристаллизации центра пластины. В модели не учитывается изменение плотности в результате фазового перехода, поскольку физические свойства среды не зависят от температуры, а определяются только составом среды.

Считается, что тепловой поток между охлаждаемым образцом и окружающей средой однозначно определен коэффициентом теплопередачи. Скорость кристаллизации определяется как скорость продвижения изотермы соответствующей температуры фазового перехода.

В дальнейшей работе И. Талмона и его коллег [60] приводится усовершенствованный метод миграции изотерм. Этот метод позволяет решить задачу кристаллизации пластин, цилиндров и сфер при граничных условиях третьего рода для двухкомпонентной среды.

Математическому моделированию задач Стефана с подвижными границами смены фаз посвящено много работ. В настоящее время широкое признание получили труды А.А. Коздобы [28–31], Ю.А. Самойловича [48], Н.И. Никитенко [45], Н.Н. Беляева, И.Н. Барабаша [8, 9], Б.В. Базалия [4, 5], О.Г. Мартыненко, И.А. Соловьева [36], Г.А. Суркова [52], Б.А. Иванцова [25], Н.П. Катышева, И.А. Павлючкова [27, 46], М. Бро [11], М.А. Бородина [10] и др. При реализации поставленных задач используются различные методы, например: метод построения разностных схем (метод сеток); вариационный метод [17], метод оптимального управления, использующий принцип максимума Понтрягина [3, 19] для функционала [25].

Анализируя перечисленные работы по моделированию задач с подвижными границами, можно сделать заключение, что для однокомпонентных сред математические методы задач данного класса хорошо отработаны.

Однако для больших слитков, формируемых на машинах непрерывного литья заготовок, которые разливают многокомпонентные сплавы, полученные решения задач в такой постановке мало пригодны, так как не позволяют учесть влияние естественной конвекции компонентов на процесс формирования слитка.

На структуру непрерывнолитых слитков существенное влияние оказывает его геометрические размеры, химический состав, температура металла, скорость разлива, интенсивность теплоотвода.

В настоящее время установлено, что химический состав стали существенно влияет на протяженность зоны столбчатых дендритов и зависит от содержания углерода [47, 56, 58]. Увеличение содержания углерода приводит [35] к увеличению зоны столбчатых дендритов при одинаковых условиях разлива.

Уменьшение поперечного размера непрерывнолитого слитка при одинаковых условиях отвода тепла приводит к измельчению зерна в его соответствующих структурных зонах [47, 56, 58].

В литературе имеются противоречивые данные о влиянии интенсивности теплоотвода от поверхности заготовки в зоне вторичного охлаждения на протяженность зоны столбчатых кристаллов в слитке. Одни [39] считают, что интенсивность отвода теплоты оказывает влияние на зону столбчатых дендритов, другие [34] — опровергают. Имеются данные о влиянии скорости разлива на структурные зоны непрерывного слитка: с увеличением скорости разлива стали увеличивается ширина зоны транскристаллизации [47, 51, 57].

В докторской работе А.А. Мочалова [40] была предложена математическая модель кристаллизации непрерывного слитка, которая дает возможность исследовать влияние изменения отдельных физических и геометрических параметров, описывающих процесс кристаллизации, на динамику процесса кристаллизации непрерывного слитка. Кроме

того, она позволяет построить операторную или комплексную передаточные функции «вход–выход» для физических величин, описывающих процесс кристаллизации, при нулевых начальных условиях. Модель заключается в разбивании слитка на следующие зоны: полностью затвердевший металл, двухфазная, буферная, зона смешения и центральная.

Анализируя изложенные результаты, можно сделать выводы, что интенсификация отвода теплоты от металла в жидкой лунке непрерывного слитка, согласно существующим теориям, возможно только за счет интенсивного отвода тепла от поверхности непрерывного слитка. Однако понижение температуры поверхности слитка приводит к термическому растрескиванию поверхности металла, ухудшая качество слитка.

Существующие математические модели не дают возможности интенсифицировать процесс отвода теплоты фазового перехода от жидкой лунки непрерывного слитка. Это говорит о том, что эти методы охлаждения непрерывного слитка исчерпали свои возможности.

## ВЫВОДЫ

Отвод теплоты фазового перехода ухудшается за счет увеличения термического сопротивления затвердевшей корочки металла [41–43]. Повышается продолжительность

кристаллизации слитка и интенсифицируются конвективные процессы в жидкой лунке слитка, способствующие возникновению в его сечении неоднородностей — температурной и концентрационной. Решить эту проблему возможно только с помощью организации объемной кристаллизации в жидкой лунке непрерывного слитка, при этом отводить теплоту фазового перехода необходимо изнутри жидкой лунки. Это достигается за счет применения новой технологической схемы отвода тепла от жидкого металла с использованием микроохлаждильников и неоднородного магнитного поля в зоне объемной кристаллизации. Такой способ кристаллизации непрерывного слитка, разработанный на кафедре физики НУК, позволяет избежать недостатков, которые присущи традиционному способу получения непрерывного слитка, описанному выше. Кроме того, он дает возможность увеличить скорость самого процесса кристаллизации и скорость разлива металла, уменьшить весогабаритные характеристики машины непрерывного литья заготовок, улучшить качество слитка; отпадает необходимость зоны вторичного охлаждения из-за отсутствия жидкой лунки. Увеличение скорости разлива позволит совместить процесс непрерывной разлива с процессом непрерывной прокатки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Акименко А.Д., Китаев Е.М., Скворцов А.А.* Тепловой расчет машин непрерывного литья стальных заготовок. — Горький: Изд. ГПИ, 1979.
- [2] *Алфинцев Г.А., Овсиенко Д.Е.* Исследование механизма роста некоторых металлических кристаллов из расплава // Рост и несовершенство металлических кристаллов: Сборник. — К.: Наукова думка, 1966.
- [3] *Атанс М., Фабл П.* Оптимальное управление. — М.: Машиностроение, 1968. — 764 с.
- [4] *Базалий Б.В., Шелепов В.Ю.* Об одной стационарной задаче Стефана // ДАН УССР. Серия А. — 1974. — № 1. — С. 5–9.
- [5] *Базалий Б.В., Шелепов В.Ю.* Об одном обобщении стационарной задачи Стефана // Математическая физика: Сборник. — К., 1975. — Вып. 17. — С. 65–81.
- [6] *Баландин Г.Ф.* Формирование кристаллического строения отливок. — М.: Машиностроение, 1973. — 285 с.
- [7] *Баттизматский В.И.* Разливка стали. — К.; Донецк: Вища школа, 1977. — 197 с.
- [8] *Беляев Н.М., Барабаш Н.М.* Математическое моделирование нелинейных задач теплопроводности с подвижными границами расчетной области // Математические методы тепломассопереноса: Сборник. — 1979. — С. 30–43.

- [9] *Беляев Н.М., Барабаш Н.М.* Применение методов теории разностных схем для исследования теплофизических процессов в стальных слитках (заготовках) // Математические методы массопереноса: Сборник, 1979. — С. 3–29.
- [10] *Бородин М.А.* Теорема существования решения однофазной квазистационарной задачи Стефана. — ДАН УССР. Серия А. — 1976. — № 7. — С. 582–585.
- [11] *Бро М.* Численный метод решения задачи Стефана // Ракетная техника и космонавтика. — 1968. — Т. 6, № 9.
- [12] *Вейнгард У.* Введение в физику кристаллизации металлов. — М.: Мир, 1967. — 387с.
- [13] *Вейник А.И.* Теория затвердевания отливки. — М.: Машгиз, 1960. — 435 с.
- [14] *Голен-Торн В.О.* Кристаллизация и строение слитка // Металлург. — 1937. — № 2, 11.
- [15] *Гречаный Я.В.* О зарождении кристаллов в двойных сплавах // Рост кристаллов; Сб. докл. на I совещании по росту кристаллов. — Изд. АН СССР, 1957.
- [16] *Данилов В.И.* Строение и кристаллизация жидкостей. — К.: Изд. АН УССР, 1956.
- [17] *Данилюк И.И.* О вариационном подходе к квазистационарной задаче Стефана // Дифференциальные и интегральные уравнения краевой задачи. — 1979. — С. 75–88.
- [18] *Джаксон К.А.* Механизм роста кристаллов // Жидкие металлы и их затвердевание: Сборник. — М.: Металлургиздат, 1962.
- [19] *Джакунов К.Б.* О влиянии фазового перехода на конвективное движение вязкой жидкости в замкнутой полости // Изд. СО АН СССР. — Серия технических наук. — 1979. — Вып. 3, № 13. — С. 78–83.
- [20] *Доботкин В.И.* Слитки алюминиевых сплавов. — М.: Металлургиздат, 1960.
- [21] *Ефимов В.А.* Разливка и кристаллизация стали. — М.: Металлургия, 1976. — 551с.
- [22] *Журавлев В.А.* Ученые записки Горьковского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (физическая серия). — Горький, 1970. — Вып. 105. — С. 60–64.
- [23] *Журавлев В.А., Китаев Е.М.* Теплофизика формирования непрерывного слитка. — М.: Металлургия, 1974. — 215 с.
- [24] *Иванцов Г.П.* К вопросу о возможности «дождя» кристаллов в стальном слитке // Сталь. — 1952. — № 10.
- [25] *Иванцов Е.А., Клименко Е.Т., Шнайдер А.* О возможности расчета оптимального температурного режима кристаллизации с использованием принципа максимума // Методы прикладной математики в нефтяной и газовой промышленности: Тр. МИНИГП. — М., 1975. — № 140. — С. 114–118.
- [26] *Кан Р.* Физическое металловедение. — М.: Мир, 1968.
- [27] *Катишев Н.П., Барабаш Н.М., Павлюченков И.А.* Математическое моделирование цилиндрической отливки сложной геометрии // Литейное производство. — 1977. — № 6. — С. 4–6.
- [28] *Коздоба Л.А.* Методы решения задач затвердевания (обзор) // Физическая и химическая обработка материалов. — 1973. — № 2. — С. 41–59.
- [29] *Коздоба Л.А., Махиенко В.И.* Решение некоторых задач металлургической теплотехники с помощью сеточного электрического интегратора // ИФЖ. — 1961. — № 4. — С. 102–104.
- [30] *Коздоба Л.А., Мельник В.И.* Влияние дискретизации пространства и времени при численном моделировании задач затвердевания // Промышленность и теплотехника. — 1980. — Т. 2, № 1. — С. 3–9.
- [31] *Коздоба Л.А., Мельник В.К.* Математическое моделирование температурных полей и задач затвердевания // Теплофизика и теплотехника. — К., 1979. — № 36. — С. 2–22.

- [32] *Колмогоров А.Н.* К статистической теории кристаллизации металлов // Изв. АН СССР (серия математическая). — 1937. — № 2.
- [33] *Кузнецов В.Д.* Кристаллы и кристаллизация. — М.: ГИТТЛ, 1954.
- [34] *Куценко Л.Т., Сладкошteeв В.Т.* Исследование структурной и химической неоднородности слябов при радиальной непрерывной разливке // Проблемы стального слитка: Тр. IV конференции по слитку. — М.: Металлургия, 1969. — С. 541–549.
- [35] *Лукиянов В.С.* Технические расчеты на гидравлических приборах Лукьянова. — М.: Тренсжелдориздат, 1937. — 28с.
- [36] *Мартыненко О.Г., Соловьев И.А.* Некоторые решения однофазной и одномерной задачи Стефана. Методы исследования и оптимизации процессов переноса. — Минск: Изд-во АН БССР, 1979.
- [37] *Миркин Л.Л.* Аналитическое исследование процесса кристаллизации // Проблемы теоретического исследования: Труды МИС. — М., 1938. — № 10.
- [38] *Мискара А.* Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. — М.: Мир, 1968. — 464 с.
- [39] *Монохин А.И.* Структурная и химическая однородность непрерывного слитка // Непрерывная разливка. Тр. ЦНИИЧМ. — М.: Металлургия, 1970. — С. 28–51.
- [40] *Мочалов А.А.* Физическое и математическое моделирование процессов, протекающих при кристаллизации слитков с учетом внешних воздействий и виброимпульсной обработки расплава и слитка: Докторская дис. Мочалова А.А. д-ра техн. наук: 05.16.02. — К.: ГПИ, 1989.
- [41] *Мочалов А.А., Коваль С.С., Коваль С.В.* Математическая модель кристаллизации сплава в буферной области слитка // Физика аэродисперсных систем. — Вып. 38. — 2001. — С. 212–219.
- [42] *Мочалов А.А., Коваль С.С., Коваль С.В.* Математичне моделювання фазових переходів в металевих конденсованих системах // Металлофізика та новітні технології. — 2002. — Т. 24, № 12. — С. 115–120.
- [43] *Мочалов А.А., Ушкац М.В., Таранчук А.А.* Математическое моделирование нестационарных температурных полей в задачах теплопроводности фазовых превращений // Сб. науч. трудов УГМТУ. — 2001. — 6 (378).
- [45] *Никитеико Н.И.* Исследование процессов тепло- и массообмена методом сеток. — Киев: Наукова думка, 1978. — 212с.
- [46] *Павлюченков И.А.* Решение сопряженных задач затвердевания отливок с принудительным охлаждением // Математические методы теплопереноса: Сборник, 1979. — С.44–49.
- [47] *Рыжков А.А.* Теоретические основы литейного производства. — Свердловск: Машгиз, 1961. — 447с.
- [48] *Самойлович Ю.А.* Формирование слитка. — М.: Металлургия, 1977. — 159с.
- [49] *Саратовкин Д.Д.* Дендритная кристаллизация. — М.: Металлургия, 1957. — 127с.,
- [50] *Сирота Н.К.* Состояние и проблемы теории кристаллизации // Кристаллизация и газовые переходы: Сборник. — АНБССР, 1962.
- [51] *Скворцов А.А., Акименко А.Я.* Теплопередача и затвердевание стали в установках непрерывной разливки. — М.: Металлургия, 1966. — 190с.
- [44] Непрерывная разливка стали на радиальных установках / В.Т. Сладкошteeв, Р.В. Потанин, О.Н. Суладзе, В.С. Рутес. — М.: Металлургия, 1974. — 285 с.
- [52] *Сурков Г.А.* Решение задачи типа Стефана с использованием линейных уравнений теплопроводности третьего порядка. Вопросы высокотемпературного тепло- и массообмена. — Минск: АН БССР, 1979. — С.118–122.

- [53] *Уолкер Дж.Л.* Структура слитков и отливок // Жидкие металлы и их затвердевание: Сборник. — М.: Metallurgizdat, 1962.
- [54] *Френкель Я.И.* Кинетическая теория жидкостей. Изд. АН СССР, 1945.
- [55] *Хворинов Н.И.* Кристаллизация и неоднородность стали. — М.: Машиниздат, 1958. — 382с.
- [56] *Холлидей И.М.* Основные вопросы непрерывной разливки // Проблемы непрерывной разливки стали. — М.: Metallurgiya, 1967. — С. 9–19.
- [57] *Хорев В.Н., Токмаков А.Н., Кобелев В.А.* Оборудование для доменных сталеплавильных цехов и установок непрерывной разливки стали. — М.: НИИИНФОРМТяжмаш, 1971. — С. 81–83.
- [58] *Чалмерс Б.* Теория затвердевания. — М.: Metallurgizdat, 1968. — 228 с.
- [59] *Чернов Д.К.* Наука о металлах. Труды Д.К. Чернова: Сборник // Под ред. Н.Т. Гузнова. — М.: Metallurgizdat, 1950.
- [60] *Talmon Y., Davis H.T. and Seriven L.E.,* Moving Boundary Problems in Simple Shapes Solved by Isotherm Migration // *AIChE. J.* — 1983. — Vol. 29. — P. 795–800.
- [61] *Talmon Y., Davis H.T. and Sriver.* Prograssive Freezing of Composites Analyzed by Isotherm Migration Methool // *AIChE J.* — 1981. — Vol. 27 (928).
- [62] *Y. Talmon, H.T.Davis,* Analysis of Propagation of Freezing and Thawing Fruits *J. Food. Sci.* — 1981. — Vol. 46 (478).