

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

**УДК 669.18:621.746.6**

**На правах рукописи**

**ЭЛЬДАРХАНОВ АДНАН САИДОВИЧ**

**ПРИМЕНЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИИ НА ПРОЦЕССЫ  
ЗАТВЕРДЕВАНИЯ СПЛАВОВ**

**Специальность: 05.16.02 - Metallургия черных металлов**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**доктора технических наук**

**Киев-1996**



AB 35.054

Работа выполнена в Физико-технологическом институте металлов и сплавов Национальной академии наук Украины и в Грозненском ордена Трудового Красного Знамени нефтяном институте им. академика Миллионщикова М.Д.

**НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ:**

академик НАН Украины, доктор технических наук, профессор Ефимов Виктор Алексеевич

**ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:**

- Чл.-корр. НАН Украины, доктор технических наук, профессор Пилющенко Виталий Лаврентьевич (Донецкий металлургический завод, г.Донецк);
- доктор технических наук, профессор Абрамов Олег Владимирович (ИОНХ РАН, г.Москва);
- доктор технических наук, старший научный сотрудник Дубоделов Виктор Иванович (ФТИМС НАН Украины, г.Киев).

**ВЕДУЩЕЕ ПРЕДПРИЯТИЕ:**

— Донецкий государственный университет (г.Донецк)

ЗАЩИТА состоится "27" ИЮНЯ 1996 г. в 10 час. на заседании специализированного ученого совета Д.01.97.01. в Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины по адресу: 252680, ГСП, г.Киев-142, проспект Вернадского, 34/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технологического института металлов и сплавов НАН Украины.

Автореферат разослан "25" "МАЯ" 1996 г.

Ученый секретарь специализированного ученого совета  
докт.техн.наук

Е.Г.Афтандилянц

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Повышенные требования, предъявляемые машиностроением к технологиям получения качественных металлических материалов, вызывают необходимость создания все более сложных и дорогостоящих агрегатов для перевода жидких металлов в литую заготовку. Это связано с тем, что формирование кристаллической структуры сопровождается такими сложными процессами, как зарождение и рост кристаллов, диффузионным перемещением ликвирующих элементов, конвективным и вынужденным движениями расплава в охлажденной отливке и развитием различных видов физической и химической неоднородностей, приводящих к резкому ухудшению качества литых материалов.

Современная теория кристаллизации выяснила роль термического, концентрационного переохлаждения, диффузионного перераспределения ликвирующих элементов и градиента температур в формировании кристаллической структуры литья. Однако при переделе жидких сплавов на современных машинах для непрерывной разливки стали, при литье под высоким и низким давлением, наложении вибрации на затвердевающий расплав возникает еще один мощный параметр, влияющий на устойчивость границ затвердевания - конвективное и вынужденное движения фаз в зоне двухфазного состояния сплавов.

В настоящее время уже изучены закономерности движения плавающих кристаллов в зоне двухфазного состояния сплава, уточнено влияние электромагнитного, газоимпульсного и других средств перемешивания расплава на процесс затвердевания слитков и непрерывно-литых заготовок.

Наибольший интерес в этом отношении представляет вибрационная обработка затвердевающих сплавов, которая воздействует не только на перемешивание сред в междендритном пространстве, но и на перемещение центров кристаллизации, модификаторов, дисперсных частиц, неметаллических включений в замкнутом объеме слитка. Поэтому появилась настоятельная необходимость в создании теории кристаллизации сплавов, способной включить в себя, кроме известных параметров термической конвекции наиболее значительные виды массопереноса в междендритном пространстве кристаллической структуры. К числу наиболее действительных из них относятся усадочная, термокапиллярная и термоконцентрационная микроконвекция в междендритном пространстве. Именно эти микропроцессы, наряду с фазовыми переходами и переохлаждением, определяют качественные характеристики литого металла.

Разработка новых технологий и оборудования для передела жидких металлов и сплавов требует предварительной теоретической проработки и прогноза принимаемых технологических решений. Широкие возможности в этом плане представляет физическое моделирование процессов кристаллизации на прозрачных средах и органических материалах. Такая методика создания новых кристаллизационных процессов в последние годы успешно применяется для определения оптимальных параметров кристаллизации слитков, непрерывнолитых заготовок, крупных отливок, получения толстых плит, объектов космического материаловедения и других методов литья. Успешное изучение фронта кристаллизации и образования локальных ячеек термоконцентрационной конвекции в прозрачных расплавах, проведенное Центром ядерных исследований Франции, доказало эффективность применения этих методов для моделирования нестационарных процессов затвердевания.

Настоящая работа предусматривает применение физического моделирования для визуального изучения влияния кристаллизационных параметров в поле упругих волн на устойчивость фронта затвердевания, динамику роста кристаллов и топографию кристаллической структуры литья. Рассмотрение эффективности наложения упругих колебаний на затвердевающий расплав позволяет раскрыть механизм измельчения кристаллической структуры литья, явление периодической кристаллизации сплавов и связь их с развитием зональной химической неоднородности в крупных слитках.

Изучение процессов кристаллизации в гравитационном поле и в условиях наложения внешних воздействий на прозрачных средах открывает неограниченные возможности для создания новых прогрессивных, конкурентоспособных технологий высокого уровня. В качестве примера приложения этого метода выбран процесс вибрационного воздействия на кристаллизующийся расплав в пределах от переохлажденных расплавов, находящихся в гравитационном поле, до низкочастотной и высокочастотной обработки материалов. Анализ развития вибрационных сил и кавитационных явлений позволяет разработать эффективные рекомендации по применению того или иного вида вибрации и месту приложения его импульса.

Представленная к защите работа является теоретическим и экспериментальным обобщением в области металлургии, связанным с изучением влияния конвективного, термокапиллярного и термоконцентрационного массопереносов на формы роста кристаллов в неравновесных условиях кристаллизации сплавов. Она способствует решению важной народно-хо-

заявленной проблемы - повышению физико-механических и технологических свойств литых металлов и сплавов за счет применения внешних воздействий на затвердевающий расплав.

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с Координационным планом секции "Процессы литья" НАН Украины по тематике проблемной комиссии "Теплофизика процессов кристаллизации сплавов". Полученные результаты проверялись при вибрационной обработке стальных слитков и использовались при проведении исследований по бюджетным и хозяйственным темам ИПЛ НАН Украины на различных заводах СНГ.

**Цель работы.** Исследование процессов конвективного теплопереноса в условиях неравновесного роста кристаллов в поле упругих колебаний и создание научных основ для выбора рациональных методов и эффективных технологий вибрационной обработки затвердевающих сплавов.

**Методы исследования.** Для достижения поставленной задачи было создано около десяти экспериментальных установок для визуального изучения различных форм роста кристаллов и формирования слитков на плоских и капиллярных образцах, а также водоохлаждаемых по заданному режиму изложницях. Для визуального наблюдения устойчивости границ затвердевания применялись прозрачные расплавы из тимола, салола, азотнокислого кальция, циклогексанола, камфена и др. органических веществ. Эффективность вибрационной обработки проверялась на промышленных слитках из алюминия и стали. Температурный режим экспериментальных установок контролировался с точностью до 0,1 К, а воспроизводимость результатов достигала 90%.

Обобщение влияния на процессы кристаллизации термокапиллярного массопереноса, а также действия сил при вибрационной обработке расплавов, проводилась на базе анализа существующих фундаментальных количественных зависимостей, наиболее наглядно отражающих вклад каждого параметра в изучаемый процесс.

Исследование макро- и микроструктур, механических свойств слитков и образцов после вибрационной обработки стали и алюминия проводилось по общепринятым методам.

На базе теории подобия определялись критерии Био, Нуссельта, Прандтля, Грасгофа и критерий фазового перехода, которые позволили произвести пересчет результатов физического моделирования на промышленные слитки.

### Научная новизна.

1. Рассмотрены особенности неравновесного роста кристаллов с учетом массопереноса ликвирующих элементов, вызываемого усадкой сплава, термокапиллярной и термоконцентрационной конвекцией ликвирующих элементов в междендритном пространстве затвердевающего сплава. В результате проведенного анализа процессов кристаллизации выявлены параметры для эффективного воздействия на них упругими колебаниями.

2. Созданы физические модели и экспериментальные установки, позволившие изучить формы роста кристаллов в прозрачных моделирующих средах в зависимости от переохлаждения и параметров вибрационной обработки сплава. При этом был выявлен механизм влияния межфазной поверхностной энергии на периодическое скопление переохлажденных объемов и центров кристаллизации у основания междендритного пространства и установлено его влияние на морфологию кристаллической структуры сплава.

3. Разработаны методика и экспериментальное оборудование для изучения влияния упругих волн на теплофизические условия затвердевания и формирования кристаллической структуры металлических расплавов. Показано, что вибрационная обработка слитков стали 35Л и 55Л вызывает измельчение первичной структуры, создает благоприятное перлитно-ферритное строение вторичных превращений и обеспечивает получение сульфидных включений глобулярной формы. Вибрационная обработка стальных слитков увеличивает твердость литой структуры на 30 - 40%, предел прочности и предел текучести на 15 - 17%.

4. Рассмотрены баланс и расположение сил, действующих на центры кристаллизации и неметаллические включения, находящиеся в замкнутом пространстве и показана зависимость форм кристаллов и распределения включений от типа и параметров применяемых упругих волн. Объяснены причины противоречивых результатов, полученных различными исследователями при применении вибрационной обработки сплавов.

5. Разработано универсальное экспериментальное оборудование, позволяющее изучать различные режимы кристаллизации на плоских и капиллярных образцах. Выявлена общая для всех методов затвердевания больших масс расплава закономерность появления периодических структур в зависимости от переохлаждения, масштабного фактора и условий теплоотвода. Обобщение полученных экспериментальных данных позволило теоретически обосновать периодическую кристаллизацию сплавов в поле упругих колебаний.

6. На основе теории периодичности физико-химических процессов раскрыт механизм развития периодической кристаллической структуры и зональной неоднородности при затвердевании больших масс металла. Предполагается, что периодическая кристаллизация связана с периодическим накоплением тепла кристаллизации в жидко-твердой зоне, превышающим предельно возможный теплоотвод через уже затвердевший слой металла.

7. На основе анализа теплофизических условий затвердевания и моделирования на четырех типах водоохлаждаемых изложниц изучены закономерности развития естественной и вынужденной конвекций в объеме слитков. Проведен принципиально важный анализ процессов кристаллизации в условиях конвективного движения сплава. Установлено наличие нисходящего (в пределах 80 - 150 мм) и восходящего потоков в объеме слитка и существенное отклонение осей дендритов первого порядка в сторону набегающего потока. Наложение упругих волн приводит к разрушению зон двухфазного состояния и перемешиванию плавающих кристаллов по всему объему слитка.

8. Рассмотрение баланса и расположения вибрационных сил при обработке расплава упругими волнами в вертикальном, горизонтальном и тангенциальных направлениях позволило разработать теоретические основы создания принципиально новых эффективных технологий вибрационной обработки затвердевающих сплавов.

Практическая значимость работы. Созданные экспериментальные установки для визуального изучения различных форм роста кристаллов позволяют получать самые разнообразные кристаллические структуры в зависимости от теплофизических условий затвердевания, параметров вибрации и других условий. Они позволяют прогнозировать наряду с формой получаемых кристаллов также и технологические принципы производства требуемых материалов.

Анализ вибрационных сил, действующих на центры кристаллизации, неметаллические включения и газ, может быть основой для выбора рациональных параметров вибрационной обработки расплавов и получения требуемого измельчения кристаллических структур. Определены оптимальные места подачи вибрационного импульса к слитку и непрерывной заготовке, что закреплено авторским свидетельством.

Впервые экспериментально установленное явление периодической кристаллизации сплавов при наложении вибрации позволило разработать мероприятия по управлению технологией периодического измельчения кристаллических структур при затвердевании.

Моделирование гидродинамических процессов и конвективного движения расплава внутри затвердевающего слитка показал возможности прогнозирования оптимальных параметров рационального подвода металла, определения топографии развития потоков естественной и вынужденной конвекций и наметить оптимальные режимы теплоотвода.

Полученные в диссертационной работе результаты изучения методом физического моделирования теплофизических условий затвердевания модельных и металлических сплавов в изложницах подтверждены и уточнены известными опытными данными и использованы на ряде заводов для выбора и усовершенствования рациональных режимов литья, вибрационной обработки и кристаллизации сталей и сплавов.

Совместно с сотрудниками Института проблем литья НАН Украины и заводами разработаны и опробованы в производственных условиях технологические рекомендации по выбору оптимальных режимов виброобработки. Материалы, подтверждающие эффективность использования результатов работы, приведены в приложении к диссертации.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Методы и экспериментальные установки для изучения неравновесных форм роста кристаллов на физических моделях с применением прозрачных сплавов из органических веществ, алюминия и стали. Закономерности влияния микроконвективных, термокапиллярных и термоконцентрационных процессов массопереноса на структуру поверхности раздела фаз и механизм перемещения ликватов на границу затвердевания сплавов.

2. Особенности кристаллизации сплавов в условиях термической и вынужденной конвекций при отливке слитков из салолла, алюминия и стали. Закономерности развития пограничных слоев и присоединенных масс при конвективном движении расплава вдоль границы затвердевания и вызываемых ими изменений в кристаллической структуре литья.

3. Теоретические основы выбора эффективных технологий и оптимальных режимов вибрационной обработки сплавов вертикальной, горизонтальной и горизонтально-круговой волной.

4. Механизм периодической кристаллизации сплавов и закономерности влияния теплофизических условий формирования зональной химической и кристаллической неоднородностей при затвердевании больших масс расплава.

5. Особенности процесса послыонного роста кристаллов и теоретическое обоснование периодической кристаллизации сплавов в поле упругих колебаний.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной и 14 Всесоюзных, Республиканских и Межрегиональных научно-технических конференциях и семинарах: на X Юбилейных физических чтениях Северо-Кавказского научного центра высшей школы (г. Орджоникидзе, 1982 г.); на Всесоюзной конференции "Проблемы комплексного освоения нефтяных и газовых месторождений" (г. Учкекен, 1984 г.); на семинаре Всесоюзного химического общества им. Д.И.Менделеева "Теоретические основы химической технологии" (г. Москва, МГУ, 1982 г.); на Всесоюзных научно-технических конференциях по проблемам стального слитка "Усовершенствование процессов разлива и кристаллизации стали" (г. Киев, 1984; г. Волгоград, 1990 г.); на семинаре "Физика межфазных явлений" (г. Нальчик, 1984 г.); на семинаре "Физика кристаллизации" Института металлофизики АН УССР (г. Киев, 1984 г.); на семинаре Института металловедения и физики металлов ЦНИИЧМ (г. Москва, 1984 г.); на объединенном семинаре Института физики твердого тела АН СССР (г. Москва, 1985 г.); на Всесоюзной конференции "Пути развития научно-технического прогресса в нефтегазовой промышленности" (г. Грозный, 1986 г.); на VII Всесоюзной конференции "Новые высокопроизводительные технологические процессы, высококачественные сплавы и оборудование в литейном производстве" (г. Каунас, 1986 г.); на XII Республиканской научно-практической конференции Дагестана (г. Махач-Кала, 1988 г.); на Международной научно-технической конференции "Ультразвук в технологии машиностроения-91" (г. Архангельск, 1991 г.).

Работа "Механизм влияния упругих колебаний на формирование кристаллической структуры" была удостоена первой премии и Диплома Всесоюзного Совета научно-технических обществ СССР.

Публикация результатов. По теме диссертации опубликовано две монографии, 30 работ в научно-технических журналах и сборниках, получено 2 авторских свидетельства.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, каждая из которых заканчивается выводами, заключения (основные выводы), где отражены наиболее значимые результаты исследования и списка цитируемой литературы.

Работа изложена на 380 страницах, включая 142 рисунка и 8 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 251 наименование.

В первой главе изложены особенности кристаллизации сплавов с учетом массопереноса ликвирующих элементов в междендритном пространстве, вызываемого усадкой сплава, действием межфазного поверхно-

стного натяжения, термоконцентрационной конвекцией и молекулярной диффузией примесей. Рассмотрены основные кинетические закономерности неравновесного роста кристаллов и выявлены возможные параметры для эффективного воздействия на них упругими колебаниями.

Во второй главе приведены обоснование и методика исследования кинетики и форм роста кристаллов в высокоэнтропийных моделирующих средах. Приведена разработанная физическая модель, которая позволяет изучать рост кристаллических структур в зависимости от значений свободной энергии системы, величины переохлаждения сплава и распределения его в микрообъемах фронта затвердевания.

Рассмотрены условия кристаллизации при наложении упругих колебаний на расплав и конструкция оборудования для подвода вибрационного импульса к плоским образцам и слиткам из металлических расплавов. Приведены результаты вибрационной обработки слитков из алюминия, стали и салола, а также данные по ее влиянию на макро- и микроструктуру, распределение неметаллических включений и механические свойства стали. Кроме того рассмотрены условия развития вибрационных сил, действующих на центры кристаллизации и неметаллические включения, при воздействии вертикальной, горизонтальной и бегущей волн на расплав.

В третьей главе описана универсальная установка для изучения процессов периодической кристаллизации сплавов на плоских и капиллярных образцах. Установлены закономерности развития этих структур в зависимости от переохлаждения сплава, масштабного фактора и параметров вибрации. Приведены результаты теоретического анализа распределения температурных полей и давлений в зоне кавитации и расчеты протяженности различных зон периодической кристаллизации.

В четвертой главе освещены результаты анализа развития периодической кристаллизации, зональной химической неоднородности в крупных стальных слитках. Определены теплофизические особенности капиллярного массопереноса ликвидирующих элементов и их влияние на зональную химическую неоднородность слитка, технологии разлива стали и других параметров.

В пятой главе приведен анализ развития естественной конвекции на границе затвердевания стали и результаты расчета изменения скорости и толщины пограничного слоя на примере слитков массами 51 и 142 т. Определены интенсивность тепломассопередачи на верхнем и нижнем горизонтах слитка. Описана физическая модель и конструкция водоохлаждаемой изложницы для изучения процессов кристаллизации в услови-

ях воздействия развитой конвекции и упругих волн. Получены экспериментальные данные по механизму разрушения зон двухфазного состояния и перемешиванию расплава.

В шестой главе рассмотрены условия теплоотвода от перегретого расплава к стенке формы через затвердевший слой металла и от растущих индивидуальных кристаллов жидко-твердой зоны слитка через жидкую фазу. Приведен анализ различных методов вибрационной обработки при ориентации амплитуды в вертикальной, горизонтальной плоскостях и перемещения волн с круговой амплитудой в горизонтальной плоскости. Установлено, что с точки зрения измельчения кристаллической структуры наиболее эффективным воздействием является вибрация волной с круговой амплитудой. Преимущества обработки круговой волной проверялись на гидравлической модели. На основании анализа применяемых методов вибрационной обработки и вызываемых ими распределения сил, предложены рекомендации по выбору оптимального метода воздействия на затвердевающий объект и места приложения к нему вибрационного импульса.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

В введении обоснована актуальность работы, сформулирована ее цель, изложены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту, дано краткое описание работы.

### ГЛАВА I. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СПЛАВОВ

Современная теория кристаллизации сплавов рассматривает фазовый переход расплава из жидкого в твердое состояние в условиях роста кристаллов в неподвижной среде с учетом термического и концентрационного переохлаждения, но без учета конвективного движения расплава. Однако, при затвердевании больших масс металла, которые имеют место при формировании отливок, слитков и непрерывнолитых заготовок, весьма существенное влияние оказывают процессы конвективного движения расплава, как вдоль границы затвердевания, так и в зоне двухфазного состояния сплава. Наличие таких процессов приводит, например, к тому, что реальная скорость массопереноса ликвидующих элементов при формировании зональной химической неоднородности на несколько порядков больше, чем скорость молекулярной диффузии.

Только в последние годы появились работы Р.Эллиота, Г.Марантони, А.И.Вейника, Г.Фроберга, В.А.Ефимова и др., которые рассматривают

неравновесный рост кристаллов с учетом конвективного движения расплава. При этом для изучения явлений, происходящих в жидкой фазе на границе затвердевания, создан ряд методов, позволяющих контролировать поведение центров кристаллизации, неметаллических включений и газовых пузырьков под действием градиентов температуры и конвекции. Основной особенностью таких работ является использование различных методов исследования явлений на прозрачных средах с применением физических моделей. Рост кристаллов всегда связан с переохлаждением расплава и возникновением термокапиллярного массопереноса ликвидирующих элементов в междендритном пространстве твердо-жидкой зоны затвердевающего сплава. Обобщение всех видов микроконвекций, наблюдаемых в ней, можно охарактеризовать двумя следующими механизмами переноса:

1) массоперенос, не зависящий от силы тяжести - усадка при затвердевании сплавов, конвекция, вызванная разностью поверхностных натяжений между твердой и жидкой фазами (конвекция Марангони) и молекулярная диффузия.

2) массоперенос, обусловленный действием силы тяжести - естественная конвекция, вызываемая различной плотностью горячего и охлажденного у стен формы расплава, всплывания или опускания частиц под действием архимедовых сил и седиментации.

Знание особенностей, вызывающих тот или иной вид переноса, необходим для того, чтобы оценить влияние на них ускорений и сил, возникающих при наложении на затвердевший расплав упругих колебаний.

Конвекция, связанная с усадкой при затвердевании сплава, вызвана изменением объема при затвердевании. При переходе жидкой фазы в твердую происходит уменьшение объема расплава в междендритном пространстве и выделение в него ликватов. Возникающий при усадке трехмерный поток жидкой фазы, направленный перпендикулярно поверхности затвердевания, может существенно влиять на перемещение и распределение ликвационных выделений между ветвями растущего дендрита.

Перенос под действием сил поверхностного натяжения зависит от величины сил межфазного поверхностного натяжения твердой фазы и граничащего с ней расплава.

Градиенты поверхностного натяжения по длине междендритной полости вызывают развитие конвективных вихрей, которые перемещаются вдоль междендритной полости и выносят ликваты на границу затвердева-

ния. При увеличении градиента межфазной энергии, интенсивность массопереноса жидкости увеличивается.

Массоперенос, создаваемый градиентом концентрации, наблюдается при возникновении градиента плотности жидкости по оси междендритной полости. Разница в плотности затвердевающего расплава создается в пространстве между растущими кристаллами вследствие изменения концентрации легкоплавких элементов и газов, выделяемых при развитии процессов ликвации. Таким образом, суммарный диффузионный массоперенос включает в себя, кроме атомной диффузии, все выше перечисленные виды конвективного массопереноса. Он определяется градиентом температур, межфазных энергий, концентрацией ликвидирующих элементов, давлений и внешних сил.

Из теории процессов массопереноса известно, что интенсивность этого суммарного процесса характеризуется эффективным коэффициентом диффузии  $D_{эф}$ . По данным Г.Фроберга, основным параметром, характеризующим морфологию кристаллической структуры, является расстояние  $S_d$  между концами дендритов. Значение этого параметра определяется зависимостью:

$$S_d = \frac{32 \cdot \sigma \cdot T \cdot D_{эф}}{m \cdot q_{кр} \cdot (1 - R_0) \cdot R} \quad (1)$$

где:  $\sigma$  - межфазное натяжение на границе фаз;  $T$  - температура на границе;  $q_{кр}$  - тепло кристаллизации;  $R$  - скорость кристаллизации;  $R_0$  - коэффициент распределения;  $m$  - наклон линии ликвидуса по фазовой диаграмме.

Воздействуя на затвердевающий сплав вибрационными силами, можно увеличивать или уменьшать величину эффективного коэффициента диффузии  $D_{эф}$ , а соответственно и параметр  $S_d$ , характеризующий крупность кристалла.

Процесс затвердевания больших объемов металла (слиток, отливка и др.) всегда сопровождается развитием конвективного движения расплава вдоль границ затвердевания. При этом важное значение имеют тонкие механизмы взаимодействия естественной конвекции с термокапиллярной, диффузионной и вынужденной конвекциями, вызываемых наложением вибрации, ультразвука, центробежных и других сил. Конвекция оказывает влияние на любое явление, связанное с переносом вещества (диффузией), переносом количества движения (вязкостью) и переносом тепла (теплопроводностью). Поэтому, хотя металлургия является одним из старейших производственных процессов, в ней все же остается много

неясного в явлениях гравитационного и комплексного влияния различных конвективных движений на микро- и макроструктуру литых материалов. Поэтому дальнейшее развитие теории затвердевания должно проводиться с учетом вышеуказанных процессов.

Все разновидности конвекции в поле гравитации можно разделить на три следующие группы:

- 1) гравитационная конвекция, обусловленная разностью удельных весов взаимодействующих фаз;
- 2) естественная конвекция, обусловленная наличием в расплаве градиента температур;
- 3) вынужденная конвекция, вызываемая приложением на расплав внешних сил.

При формировании двухфазной зоны (наряду с зародышами кристаллизации, имеющими плотность большую, а неметаллические включения - меньшую, чем окружающий их расплав) сила воздействия на каждую моночастицу пропорциональна ее плотности. Получаемая разница сил, действующих на ту или иную частицу, является движущей силой гравитационной конвекции. Этот тип конвекции играет главную роль в процессах всплывания, седиментации и разделения фаз.

Если на жидкость в радиальном направлении накладывается температурный градиент, то механическое равновесие нарушается. Это приводит к развитию внутренних течений, стремящихся перемешать жидкость так, чтобы в ней установилась постоянная температура (свободная конвекция).

В работе подробно рассмотрены параметры всех видов конвекций и возможные способы влияния на них упругими волнами, которые могут как повышать, так и понижать плотность обрабатываемого расплава. При силовом воздействии на конвекцию, смывающую границу затвердевания, происходит перераспределение концентраций примесей, а увеличение скорости конвективных потоков приводит к уменьшению теплового пограничного слоя и к росту градиента температуры.

Устойчивость границы затвердевания и формирования кристаллической структуры зависит от влияния на нее всех видов указанных выше микроконвекций, естественной конвекции и всех видов тепло- и массопереноса. Морфология кристаллической структуры при этом зависит от условий протекания конкурирующих процессов охлаждения и затвердевания. Во всех случаях заданной технологами скорости охлаждения сплава формирование кристаллической структуры определяется протеканием на границе вышеуказанных видов массопереноса.

При рассмотрении кинетики роста кристаллов обращено внимание на возможность регулирования вибрацией процессов зародышеобразования, величины переохлаждения и интенсивности теплоотвода. Подтверждается предположение о связи глубокого переохлаждения с увеличением скорости зародышеобразования, для достижения которого необходимо, чтобы фронт охлаждения распространялся в расплаве со скоростью, сравнимой со скоростью кристаллизации. Возможность создания больших переохлаждений путем вибрационного перемешивания и интенсификации теплоотвода открывает пути для получения литых структур с повышенными свойствами.

Основной целью анализа процессов тепломассопереноса при кристаллизации сплавов, приведенного в этой главе, является выявление тех параметров роста кристаллов, на которые можно влиять упругими волнами при вибрационной обработке сплавов.

## ГЛАВА 2. ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ И ФОРМ РОСТА КРИСТАЛЛОВ НА МОДЕЛИРУЮЩИХ СРЕДАХ

Изучение кристаллизационных процессов проводилось на прозрачных органических веществах высокой чистоты, которые применяли при исследовании гетерогенной кристаллизации В.И.Данилов, Д.Е.Овсиенко, Т.А.Алфинцев, И.Н.Фридляндер и др. Это вызвано тем, что для этих веществ можно применить тонкие методы очистки от посторонних частиц и устранить влияние растворенных примесей. Только при таких условиях можно выяснить роль примесей в развитии неравновесных форм кристаллов и установить зависимость их от переохлаждения и других параметров кристаллизации. Важным преимуществом указанных моделирующих веществ является то, что они относятся к высокоэнтропийным веществам, величина энтропии плавления которых составляет  $\Delta S > 4$ . При кристаллизации этих веществ, даже при относительно высоких переохлаждениях, кристаллы сохраняют правильную форму и обладают достаточной морфологической устойчивостью. Вещества с малой энтропией плавления ( $\Delta S < 2$ ), к которым относятся металлы, указанной устойчивостью кристаллических форм не обладают.

В работе эти материалы применяли для выяснения влияния упругих волн на процессы кристаллизации и проводился их сравнительный анализ с обычными условиями формирования неравновесных структур затвердевающих сплавов в неподвижной среде.

Исследуемый препарат помещался между двумя тонкими плоско-параллельными пластинками, смонтированными в специальную камеру.

Нижняя пластинка охлаждалась проточной водой, задающей темп переохлаждения расплава.

Исследования проводились в процессе продвижения фронта слоя салола толщиной 0,12 мм при различных переохлаждениях сплава. Киносъемку и видеозапись границы затвердевания делали непрерывно в процессе кристаллизации всего препарата. Для получения надежных результатов получали на экране 70-кратное увеличение исследуемого объекта.

При охлаждении салола на  $\Delta T=7K$  и увеличении свободной энергии системы происходит интенсивный рост кристаллов в виде плотных колоний равной толщины (рис.1а). Средняя скорость перемещения кристаллического фронта составляла  $R=3,75$  мм/мин. Чем меньше переохлаждение, тем размер кристаллов больше. По мере увеличения переохлаждения (более 30K), вершины кристаллов резко выступают перед границей затвердевания (рис.1б). Радиус их вершин и толщина при увеличении переохлаждения непрерывно уменьшаются.

Морфологическая устойчивость границы затвердевания в проводимых исследованиях наблюдалась до определенного переохлаждения расплава. При переохлаждении  $\Delta T=40K$  кристаллы резко увеличивали скорость роста и выходили за границу затвердевания, образуя резко выраженный зигзагообразный фронт кристаллизации. Когда размеры выступов и впадин кристаллического фронта достигали определенной величины, условия равновесия и морфологической устойчивости нарушались и происходил рост новых кристаллов. Каждый кристалл имел свое начало в устье впадины и по мере роста, его диаметр непрерывно увеличивался, создавая конусообразные участки новых кристаллических образований (рис.1б). Каждый новый кристалл растет до тех пор, пока его размер достигнет определенной величины, после которой условия равновесия снова нарушаются и начинается рост последующего пакета кристаллов. Такой механизм роста связан с периодическим накоплением в устье впадин значительных объемов переохлажденного сплава, а скопление центров кристаллизации в этом месте служит основой для последующего послойного роста новых кристаллов. То обстоятельство, что каждый такой слой нарастает от одного зародыша, подтверждает механизм послойного роста высокоэнтропийных материалов.

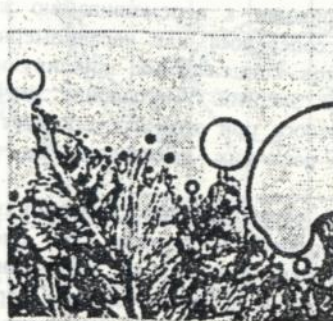
Раскрытый механизм межфазного взаимодействия затвердевающего сплава показывает роль межфазной энергии (конвекции Марангони) в формировании кристаллических структур.



а)



б)



в)

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

Рис.1 Кристаллические структуры сала в плоских препаратах:

а)  $\Delta T = 7K$ , б)  $\Delta T = 30K$ , в)  $\Delta T = 407K$

Значительный интерес представляет механизм захвата растущим кристаллом пузырьков воздуха как источников кавитационных эффектов при виброобработке сплавов. Анализ кристаллических структур салола показал, что при малых скоростях кристаллизации газовая фаза выделяется в пространстве между граничащими кристаллами (рис.1а).

Если переохлаждение увеличивалось до  $\Delta T = 30-40\text{K}$ , перед фронтом кристаллизации, одновременно с быстрым ростом объемов твердой фазы увеличивается и объем выделяющейся газовой фазы. При этом появляется большое количество пузырьков воздуха, радиус которых может быть близким к критическому (рис.1в).

В этой главе приведены также результаты исследования условий кристаллизации сплавов при наложении упругих колебаний. Решению этой проблемы посвящены работы О.В.Абрамова, В.И.Добаткина, Г.И.Эскина, В.Л.Пилюшенко, А.Н.Смирнова, В.Х.Межидова, А.А.Скворцова и других авторов.

Результаты наших исследований показали, что определяющим фактором на формирование кристаллических структур в поле упругих колебаний является периодическое возникновение у межфазной границы зоны пониженного и повышенного статического давлений. Снижение этого давления вызывает перемешивание и перемещение объемов жидкой фазы из межкристаллитного пространства к фронту кристаллизации. Это способствует не только разрушению ветвей дендрита и измельчению кристаллической структуры, но и выравниванию концентрации ликвирующих элементов в этом пространстве.

Знакопеременное давление приводит к перемешиванию жидкой фазы, ликвидирует такие процессы массопереноса, как неравномерное распределение переохлаждения, градиентов концентраций, ликвирующих элементов и межфазных поверхностных энергий. Уменьшение значения эффективного коэффициента массопереноса при этом способствует сокращению расстояния между вершинами растущих кристаллов  $S_d = f(D_{эф}, R)$  и измельчению литой структуры.

Эффективность вибрационной обработки высокоэнтропийных материалов изучалась на плоских образцах и слитках. На рис.2 показаны кристаллические структуры азотнокислого кальция, полученные на экспериментальной установке без вибрации и при наложении упругих волн. В нижней части этих рисунков видны участки крупнокристаллической структуры, полученные до вибрационного воздействия, а в верхней - после наложения упругих волн.

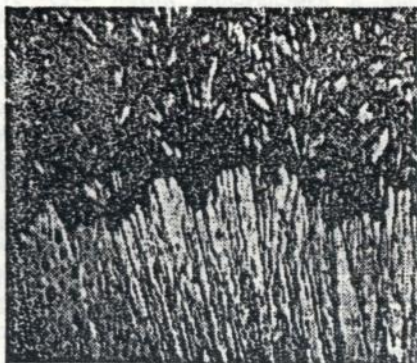


Рис.2 Кристаллические структуры азотнокислого кальция без вибрации и при наложении упругих волн

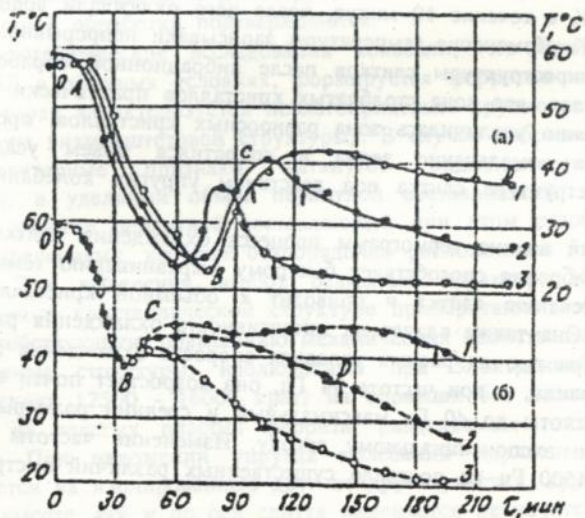


Рис.3 Термограммы затвердевания слитка шолоа: без вибрации (а) и при действии вибрации (б).

Многочисленные экспериментальные данные убедительно показали положительную роль вибрации в измельчении литой структуры. Размер кристаллов после подключения вибрации даже при небольших частотах колебания, уменьшился в 4-5 раз. Обращает на себя внимание равномерность морфологии кристаллов с постоянными их размерами на всей протяженности вибрируемого плоского препарата. Такое распределение дисперсных кристаллов, по-видимому, свидетельствует об объемной кристаллизации расплава и одновременного их роста из равномерно разбросанных в объеме слитка центров кристаллизации.

Натурные испытания металлических слитков промышленных размеров весьма громоздки и дороги, поэтому опыты по влиянию параметров упругих колебаний на структуру слитка изучали на моделях с использованием моделирующих веществ из органических материалов.

Исследования проводили на экспериментальной установке, основными элементами которой являются: вибратор, термостат, осциллограф, потенциометр и кристаллизационная камера. Камера состоит из цилиндрической емкости диаметром  $75 \cdot 10^{-3}$  м и высотой 0,18 м, имеющей рубашку для охлаждения и крышку с отверстием для термопара.

Расплав сплава термостатировали в кристаллизационной камере при температуре 333К в течение 10 минут, после чего охлаждали водой при температуре 291К. Изменение температуры записывали непрерывно.

Сравнение макроструктуры слитков после вибрационной обработки с обычными показало, что зона столбчатых кристаллов практически исчезла и соответственно увеличилась зона равноосных кристаллов, произошло значительное измельчение зерна и сократился объем усадочной раковины. Макроструктура слитка под действием упругих колебаний уплотняется.

Сравнительный анализ термограмм процесса охлаждения слитков показывает, что вибрация способствует быстрому выравниванию температуры по всему сечению слитка и приводит к объемной кристаллизации сплава (рис.3). Она также влияет на интенсивность охлаждения расплава в изложнице. При прочих равных условиях скорость охлаждения зависит от частоты вибрации, а при частоте 94 Гц, она возрастает почти вдвое.

С ростом частоты до 40 Гц максимальный и средний размеры зерна уменьшаются по экспоненциальному закону. Изменение частоты вибрации от 50 до 4500 Гц не показало существенных различий в структуре слитка.

При наложении упругих колебаний на затвердевающий сплав алюми-

ния, столбчатая структура разрушается и переходит в мелкую равноосную.

Для исследования влияния вибрации на кристаллизацию стального слитка использовались цилиндрические и квадратные изложницы для слитков массой от 8 до 1000 кг. Для установления принципиального влияния интенсивности тепловода их выполняли из стали, чугуна и керамики.

Опыты проводились как на контрольных слитках, так и при действии вибрации ( $\omega=47$  Гц,  $A=0,6$  мм). В опытах с применением вибрации перед заливкой включали вибратор и продолжали виброобработку в течение 30 мин. Исследования проводили на сталях ст35Л и ст55Л. Цилиндрические слитки из этих сталей, полученные в керамических изложницах, показали, что усадочная раковина слитков, отлитых под действием вибрации, почти во всех случаях в 3-4 раза меньше, чем обычных. Кристаллическая структура получается более плотной, а размер дендритов в 5-8 раз меньше, чем при затвердевании в спокойном состоянии.

Вибрированные слитки в изложницах из чугуна имели более дисперсную структуру, чем отлитые в керамические изложницы и были более плотными и мелкозернистыми, чем обычные без вибрации. При изменении отношения высоты к диаметру слитка с 1,5 до 3,64 преимущественно вибрационной обработки подтверждаются.

Металлографические исследования показали, что при затвердевании стали 35Л в обычных условиях, формируется ферритно-перлитная структура, которая характеризуется неблагоприятным крупногочечатым строением (типа видманштетовой структуры). В случае вибрационной обработки характерные признаки вытянутой видманштетовой структуры исчезают, а удельный объем перлитной составляющей возрастает. Отдельные участки перлитной составляющей при этом разобщены ферритными выделениями, которые беспорядочно расположены на всей площади шлифа. Эти выделения имеют размытый характер. Неметаллические включения в кристаллической структуре приобретают глобулярную форму, способствующую повышению механических свойств стали.

Элементы структуры, наблюдаемые при электронной микроскопии (увеличениях 12500 - 16000 крат) на образцах без наложения вибрации состоят из толстых пластин феррита, разделяемых тонкими участками перлита. При наложении упругих колебаний перлитная составляющая разбивается на изолированные друг от друга участки, крупность которых как по высоте, так и по оси слитка изменяется незначительно.

Анализ механических свойств металла различных слитков показал, что вибрационная обработка увеличивает твердость литой стали 35Л на 30—40% и обеспечивает рост как предела прочности, так и предела текучести на 15—17%.

Для изучения поведения включений в расплаве, находящихся в поле упругих колебаний, был проведен анализ действия вибрационных сил на перемещение центров кристаллизации, неметаллических включений и газовых пузырьков.

Причиной возникновения сил, приводящих к направленному перемещению центров кристаллизации и плавающих кристаллов определяется противодействием вибрационной силы и силы вязкого сопротивления среды. Периодические колебания среды приводят к знакопеременному ускорению частиц как в излучаемом пространстве, так и во времени. Это приводит к тому, что среднее за период колебания значение силы, действующей на включения, будет отлично от нуля. Под действием такой силы они могут совершать направленное перемещение. Управлять этим перемещением можно выбором оптимальных значений амплитуды и частоты колебаний.

Изучение динамики перемещения сферических включений показало, что на этот процесс влияет вязкость и неоднородность жидкости, конфигурация вибрируемого пространства и место расположения открытой поверхности расплава в нем.

В работе проведено обобщение результатов по изучению влияния направления упругих волн в объеме на перемещение моночастиц, имеющих различную плотность. Анализ показал, что дегазация сплавов и удаление неметаллических включений имеет максимальное развитие при условии, когда частота вибрации сосуда с расплавом в два раза меньше собственной частоты колебаний газовых пузырьков или неметаллических включений.

Представленная на рис. 4а схема ячейки растущего дендрита показывает исключительно неравномерное распределение температур и переохлаждений расплава вдоль ветви дендрита. Между вершинами этих ветвей дендритная структура в достаточной мере открыта для выхода жидкой фазы. Поэтому при наложении вибрационной силы на рассматриваемую ячейку происходит перемещение жидкой фазы и разрушение ветвей дендрита (рис.4б). Температура в интервале затвердевания и переохлаждение усредняются по всему сечению ячейки, а в бывшем междендритном пространстве появляются зародыши кристаллизации, которые затем

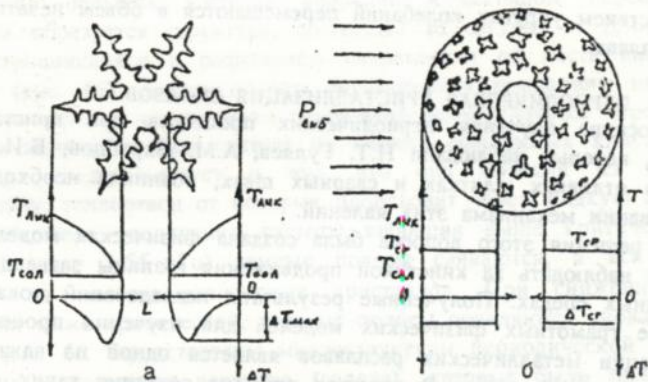


Рис.4 Рост дендритов и изменение температур в спокойном состоянии (а) и в условиях действия вибрационного давления (б)

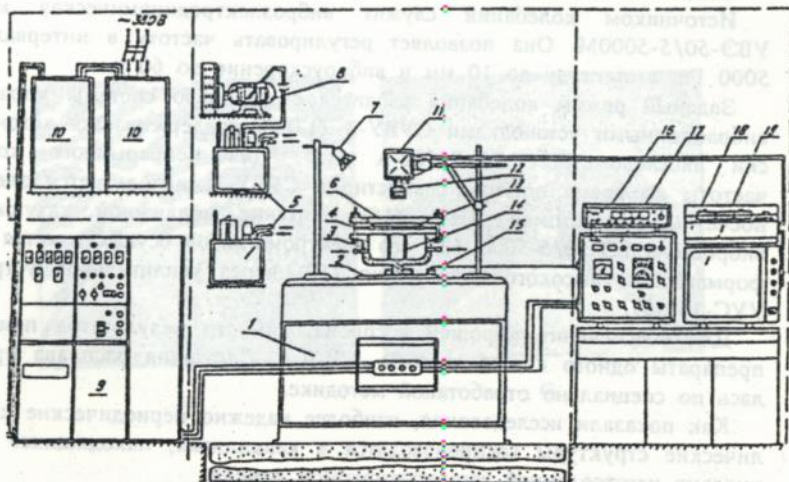


Рис.5 Схема базовой экспериментальной установки для изучения процессов кристаллизации

под действием упругих колебаний перемещаются в объем незатвердевшей части сплава.

### ГЛАВА 3. ПЕРИОДИЧЕСКАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СПЛАВОВ

На основе изучения периодических процессов при кристаллизации сплавов, которые наблюдали Н.Т. Гуляев, А.М. Скребцов, Б.И. Медовар и др. в отливках, слитках и сварных швах, возникла необходимость в исследовании механизма этих явлений.

Для решения этого вопроса была создана физическая модель, позволяющая наблюдать за кинетикой продвижения границы затвердевания на прозрачных средах. Полученные результаты исследований показали, что создание грамотных физических моделей для изучения процессов кристаллизации металлических расплавов является одной из важных задач фундаментальной науки. В качестве примера создания таких средств, в этой главе показаны методы исследования и базовое экспериментальное оборудование, которое весьма успешно было использовано для изучения периодической кристаллизации сплавов, условий роста кристаллов в гравитационном поле и в поле упругих волн.

Общая схема экспериментальной установки представлена на рис. 5.

Источником колебаний служит виброэлектродинамическая машина УВЭ-50/5-5000М. Она позволяет регулировать частоту в интервале 5 - 5000 Гц, амплитуду до 10 мм и виброускорение до 60 g.

Заданный режим колебаний вводится с помощью системы управления вибрационными установками СУВУ-3 (17) и поддерживается автоматическим акселерометром ВУ-7/500-А (15). Для непрерывного контроля частоты во время опытов, совместно с СУВУ-3, используется электронносчетный частотомер ЧН-6 (16). Питание подвижной катушки (2) вибростола ВЭ-50/5-5000 (1), его электромагнитов осуществляется трансформаторами высокого напряжения (10) через усилительное устройство УУС-16 (9).

Для обеспечения хорошей воспроизводимости результатов применяли препараты одного класса чистоты - Ч.Д.А. Дегазация расплава проводилась по специально отработанной методике.

Как показали исследования, наиболее надежно периодические кристаллические структуры воспроизводятся в капиллярах, находящихся в специально изготовленной термостатируемой камере.

В зависимости от диаметра капилляров и параметров вибрации могут быть получены следующие типы кристаллических структур:

1) при больших частотах вибрации и большом переохлаждении расплава образуется структура, состоящая из светлых и темных полос, распространяющихся в радиальном направлении от места внесения заправки (рис. 6а). Белые полосы формируются вследствие нормального роста кристаллов, при котором теплоотвод осуществляется через твердую фазу, а темные полосы состоят из мелких равноосных кристаллов. Их структура свидетельствует о том, что они выросли из плавающих кристаллов, теплоотвод от которых происходит через жидкую фазу.

2) по мере увеличения частоты вибрации выше критической (для салола  $\omega_{кр.} = 1,55$  кГц) темные полосы сливаются, а вся структура состоит из мелких равноосных кристаллов. При снижении частоты вибрации ниже критической, светлые полосы появляются снова.

На рис. 6б представлены микроструктуры периодической кристаллизации моделирующего вещества (салола), которые были получены при четырех следующих режимах: 1 - без вибрации, 2 - вибрация с высокой частотой ( $\omega = 1,63$  кГц), 3 - структура, получаемая при снижении частоты вибрации ( $\omega = 1,3$  кГц) и 4 - дальнейшая кристаллизация без вибрации. При больших частотах можно получать однородную кристал-



Рис.6 Периодические кристаллические структуры салола (а), изменение структуры в зависимости от условий их роста (б): 1,4 - без вибрации; 2, 3 - при действии вибрации

лическую структуру, образуемую только из плавающих центров кристаллизации, как это показано на примере получения второго слоя.

В результате анализа условий кавитационной кристаллизации сплавов раскрыт механизм формирования периодических структур. Показано, что при теплоотводе от расплава непосредственно через затвердевшую зону происходит направленный рост крупных кристаллов и образуется первый слой.

По мере дальнейшего затвердевания на межфазной границе происходит выделение газовых пузырьков. Попадая в поле упругих колебаний, эти пузырьки превращаются в кавитационные каверны, которые при схлопывании разбрасывают перед фронтом затвердевания мельчайшие кристаллики из разрушаемой границы затвердевания (кавитационная эрозия фронта). При этом образуется второй слой плавающих кристаллов, которые растут по всем направлениям. После завершения кристаллизации рассеяных зародышей, снова возобновляется нормальный рост крупных кристаллов сплошным фронтом и постепенное накопление кавитационных пузырьков на межфазной границе.

Как показали исследования, формирование морфологии периодических кристаллических структур связано с динамикой выхода на границу затвердевания кавитационных пузырьков и перемещение обломков ее разрушения в вязкой среде. При этом были обнаружены следующие наиболее важные зависимости:

1) количество и толщина полос периодической кристаллизации зависят от частоты вибрации. При значениях критической частоты вибрации для тимола  $\omega_{кр} = 1,15$  кГц и салола  $\omega_{кр} = 1,55$  кГц, количество полос на одном и том же участке затвердевания получается в два раза больше независимо от диаметра капилляра, что связано с максимальной скоростью формирования в этот период кавитационных пузырьков;

2) с увеличением переохлаждения значение критической частоты вибрации уменьшается, а количество полос возрастает;

3) изменение вибрационного ускорения влияет на величину давления и формирование кавитационного пузырька. Для тимола в капиллярах большего диаметра при значениях вибрационного ускорения в пределах  $a = (10-30) \cdot g$ , число полос наибольшее;

4) чем больше вязкость расплава, тем на меньшее расстояние разбрасываются разрушенные кавитацией кристаллики и получается узкая кристаллическая полоса периодической структуры сплава;

5) рост масштабного фактора увеличивает толщину кристаллизационных полос;

б) в дегазированном расплаве количество полос резко снижается.

Подводя итоги экспериментальным результатам, можно утверждать, что, выбирая оптимальные параметры вибрации и переохлаждение расплава, с учетом масштабного фактора, можно надежно управлять количеством, толщиной и расположением зон периодической кристаллизации сплавов.

На базе закона о постоянстве количества движения и изучения гидродинамических и теплофизических условий затвердевания предложены количественные зависимости для определения протяженности различных зон периодической кристаллизации с учетом влияния скорости набегающего потока, влияния межфазных сил  $\sigma$ , вязкости сплава  $\eta$  и частоты вибрации  $\omega$ . При этом толщина первого слоя направленной кристаллизации зависит от следующих параметров:

$$\lambda_1 = k \sqrt{W/G \cdot \omega}, \quad (2)$$

где:  $k$  - коэффициент скорости затвердевания сплава;  $W$  - вес газа в пузырьке докавитационных размеров;  $G$  - общий вес выделяемого газа при затвердевании первого слоя.

Формула для определения ширины зоны разбрасывания кристаллов примет следующий вид:

$$\lambda_2 = \frac{m (\pm v_{\text{виб}} - \frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{d}{\eta} \cdot \Delta T)}{\pi r (4,22B r \sqrt{\rho \eta \omega} - \delta \eta)}, \quad (3)$$

где:  $v_{\text{виб}}$  - скорость движения среды, вызываемая действием упругой волны, равная  $v_{\text{виб}} = A \omega \cos \omega \tau$ ;  $\frac{\partial \sigma}{\partial T}$  - градиент межфазной поверхностной энергии по длине капилляра;  $d$  - диаметр капилляра;  $r$  - радиус пузырька;  $\rho$  - плотность расплава;  $m$  - масса кристаллика;  $A$  - амплитуда вибрационной волны;  $B$  - коэффициент, учитывающий количество взаимодействующих фаз;  $\tau$  - время воздействия;  $\Delta T$  - переохлаждение.

#### ГЛАВА 4. РАЗВИТИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР ПРИ ЗАТВЕРДЕВАНИИ СТАЛИ

Особый интерес представляют выявленные Д.К. Черновым, Н.Т. Гудцовым, Б.Б. Гуляевым, В.М. Тагеевым, А.М. Скребцовым, Д.А. Дюдькиным и др. явления периодичности в условиях затвердевания крупных отливок и слитков. Главными причинами развития анизотропии

свойств и различной деформационной способности больших масс литого металла являются:

- периодическая неоднородность кристаллической структуры;
- периодическая химическая неоднородность затвердевшего литья;
- неоднородность распределения неметаллических включений.

Исследование повторяемости роста дендритных осей первого порядка при затвердевании стального слитка массой 142 т показало наличие зон, отличающихся по размерам дендритов в два раза. Эта повторяемость неуклонно соблюдается на расстоянии 300-350 мм от поверхности к оси на всех горизонтах слитка. Аналогичная периодичность кристаллических структур была обнаружена и на макротемплетах других крупных слитков.

Анализ теплофизических условий формирования слитка показал, что это явление связано с условиями теплопередачи расплава из двухфазной зоны к внутренней поверхности изложницы. В условиях кристаллизации больших масс металла тепловые потоки через двухфазную зону распределяются следующим образом:

- тепло от растущих дендритов и окружающей их жидкой фазы в твердо-жидкой зоне отводится к поверхности слитка через затвердевший слой металла;
- тепло кристаллизации от растущих равноосных кристаллов в жидко-твердой зоне передается к границе затвердевания через жидкую фазу, окружающую плавающие дендриты.

При затвердевании больших объемов расплава выделение теплоты кристаллизации от плавающих кристаллов может быть настолько бурным, что при определенных условиях приводит не только к остановке роста дендритов, но даже оплавлению уже затвердевших участков слитка.

Если тепловой поток от жидко-твердой зоны равен или больше предельно возможного теплоотвода от твердо-жидкой зоны к поверхности слитка, то рост вершины дендритов и продвижение фронта кристаллизации останавливается, а оставшаяся жидкая фаза и "сброс" концентрационного переохлаждения расходуется на увеличение разветвленности и уменьшение размеров кристаллов. После отвода тепла кристаллизации из жидко-твердой зоны условия теплопередачи через уже затвердевший слой металла возобновляются и размеры дендритов увеличиваются.

При затвердевании крупных слитков также наблюдается периодическое образование ликвационных выделений. Оно проявляется в периодическом появлении ликвационных полос, расположенных параллельно граням слитка. Изучение расположения шнуров зональной неоднородности сталь-

ного слитка массой 51 т показало, что они начинают развиваться на глубине 200 мм от его поверхности и затем повторяются через 80, 70 и 60 мм. Зональная неоднородность распространяется от прибыльной части до нижнего горизонта слитка, находящегося на расстоянии  $h=400$  мм от дна изложницы. Такая особенность расположения ликвационных полос была установлена и на макротамплетах слитков массой от 16 до 142 т.

Согласно термодинамической теории, это явление объясняется тем, что во время метастабильного состояния термодинамической системы, в ней возникает пространственная самоорганизация и упорядочение ее по законам неравновесной термодинамики. Установлено, что в процессе диффузионного массопереноса двух веществ, состоящий из них раствор пересыщается реагирующими элементами до образования третьей фазы в виде химического соединения. Концентрация каждого из этих компонентов после образования химического соединения равна нулю. Поступающие после этого за счет диффузии новые порции компонентов диффундируют в следующий шнур, расположенный на некотором расстоянии от первоначального места выделения ликватов.

Приведенный в этой главе теоретический анализ капиллярного массопереноса ликвирующих примесей на границу затвердевания позволил предложить зависимость для определения капиллярного давления на ликвирующие элементы в междендритном пространстве:

$$P_{\sigma} = \frac{4\sigma_{m-ж} \cdot \cos\theta}{d} - \frac{32}{\gamma} \cdot \frac{L}{d^2} \cdot \eta \cdot v_{ликв}, \quad (4)$$

где:  $\sigma_{m-ж}$  - межфазное поверхностное натяжение;  $\theta$  - угол смачивания;  $L, d$  - протяженность и диаметр междендритной полости;  $\eta, \gamma$  - вязкость и удельный вес ликватов;  $v_{ликв}$  - скорость движения ликватов в междендритном пространстве.

Из представленной зависимости видна существенная роль в перемещении ликватов к границе затвердевания вязкости затвердевающего металла и геометрических параметров капилляра. С увеличением вязкости и протяженности твердо-жидкой зоны  $L$ , объемное поступление ликватов уменьшается.

Снижение склонности к ликвационным процессам можно получить за счет регулирования содержания растворимых элементов и изменения теплофизических условий затвердевания. Наиболее интенсивно ликвируют те компоненты сплава, которые образуют стойкие химические соединения (сульфиды, оксиды и пр.). Поэтому, независимо от метода кристаллиза-

ции, необходимо элементы, образующие стойкие химические соединения, вводить в минимальном количестве.

Развитие химической неоднородности зависит также от динамики роста зоны концентрационного переохлаждения, связанного с известным отношением скорости охлаждения к скорости кристаллизации сплава.

Снижение химической неоднородности и измельчение дендритной структуры может быть достигнуто различными физическими методами воздействия, вызывающими перемешивание металла. В основе этих методов лежит смыывающее ликваты воздействие вынужденной конвекции на концентрационный пограничный слой и изменение условий роста и перераспределение примесей. Среди таких методов можно назвать воздействие упругими колебаниями, перемешивание металла магнитным полем и другими средствами.

Анализ большого количества макротемплетов слитков массой от 6 до 142 т показал также зависимость расположения ликвационных полос не только от развития физико-химических периодических процессов, но и от технологических параметров разливки стали. При этом одним из главных параметров является рациональная организация равномерного отвода тепла от поверхности слитка, которая определяется методом подвода металла в изложницу, температурой и скоростью разливки стали. Для выработки рекомендаций по заглублению ликвационных полос были детально изучены макроотпечатки наиболее ходовых слитков массой 6, 7, 8, 9, 12, 13, 16, 51, 75 и 142 т, отливаемых на металлургических и машиностроительных заводах юга Украины сифоном, через промежуточные воронки и непосредственно из ковша сверху. Одновременно проводился анализ теплофизических условий формирования некоторых из этих слитков и особенностей распределения тепловых потоков.

Анализ приведенных выше данных позволил сформулировать следующие основные параметры, влияющие на развитие химической зональной неоднородности слитков:

- склонность к развитию и увеличению угла наклона ликвационных полос и приближению их к поверхности слитка способствует неравномерный прогрев стен изложницы в процессе разливки стали; равномерный их прогрев обеспечивает более глубокому залеганию ликвационных полос;
- наибольшую неравномерность прогрева вызывает сифонный способ разливки стали. Для снижения этой неравномерности целесообразно

применять концевые стаканы с отношением его высоты  $h$  к диаметру  $d$ , равному  $h/d=3-3,5$ ;

- замена сифонной заливки стали на разливку через промежуточные устройства обеспечивает более равномерный прогрев стен изложницы и более глубокое залегание ликвационных полос;

- более равномерному прогреву стен изложницы при разливке сверху способствуют мероприятия, снижающие глубину проникновения струи разливаемой стали в объем металла, находящегося в изложнице. Таким условиям способствует понижение ферростатического давления в ковше и применение промежуточных разливочных устройств;

- уменьшение диаметра прибыли приближает ликвационные полосы к оси слитка.

#### ГЛАВА 5. ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИИ НА КОНВЕКТИВНЫЙ МАССОПЕРЕНОС В ЗАТВЕРДЕВАЮЩИХ СПЛАВАХ.

Результаты изучения особенностей развития конвективного движения в ядре незатвердевшей части слитка приведены в работах В.А.Ефимова, А.А.Скворцова и А.Д.Акименко, Е.А.Казачкова, И.Л.Повха, сотрудников его школы и других авторов.

В этой главе рассмотрены закономерности переноса количества движения и теплоты при развитии термической конвекции в замкнутом пространстве. Этот анализ необходим для выявления главных параметров воздействия на процесс перемешивания расплава в объеме затвердевающего объекта при наложении упругих колебаний.

На основе теории пограничного слоя рассмотрены условия изменения температуры и скорости конвективных потоков у границ затвердевания. Установлено, что скорость движения металла в пограничном слое на нижнем горизонте слитка массой 142 т возрастает почти в два раза, а толщина пограничного слоя - только на 20%. Такое распределение скоростей теплового и диффузионного пограничных слоев приводит к резкой дифференциации процессов теплопереноса по высоте слитка и создает условия для возникновения совершенно различных условий неравновесного роста кристаллов и анизотропии свойств литого металла.

Расчеты условий теплопередачи на основе критериальных зависимостей Нуссельта, Грасгофа и Прандтля на примере слитка массой 142 т показали, что величина коэффициента теплопередачи от внутренних перегретых объемов стали к границе затвердевания на глубине 200 см в 16 раз выше, чем на глубине 50 см от открытой поверхности металла в

изложнице. Аналогичное распределение наблюдается при диффузионном массопереносе в пограничном слое на границе затвердевания сплава.

Рассмотрение процессов, происходящих в расплаве внутри ядра слитка, вдали от поверхности границы затвердевания показывает, что интенсивное движение расплава внутри пограничного слоя не в состоянии привести в конвективное движение всю массу внутренних объемов крупных слитков, находящихся в спокойном состоянии. Оно приводит в движение только те слои металла, параметры которых равны количеству движения в пограничном слое. Из этих условий определена толщина присоединенной массы движущихся потоков вдоль вертикальной границы затвердевания.

По мере перемещения пограничных слоев и присоединенных масс в радиальном направлении с двух сторон слитка происходит их смыкание и вихревые структуры переходят в замкнутую систему конвективных потоков, при которых опускающиеся вниз слои расплава вызывают обратный поток по оси слитка. Для определения критического сечения слитка, при котором возникает замкнутая циркуляция затвердевающего расплава, приведена расчетная зависимость, связывающая толщину пограничного слоя со скоростью опускающегося и восходящего потоков расплава.

В этой главе приведены результаты экспериментального определения неизвестной до сих пор толщины пограничного слоя, опускающегося вдоль вертикальной границы затвердевания. С этой целью изучалась топография распространения конвективных потоков на макротемплетах слитков массой от 6 до 142 т. Следы этих потоков совпадают с расположением шнуров химической неоднородности и хорошо видны в местах поворота их к перегретому металлу в прибыльной надставке. Толщина их в этих местах колеблется в пределах  $R=80-150$  мм в зависимости от массы слитка.

Анализ распределения пограничных слоев и присоединенных масс затвердевающего расплава в замкнутом объеме позволил выделить три периода формирования слитков и перемещение в них центров кристаллизации и неметаллических включений. При этом в первый период происходит развитие пограничного слоя вдоль вертикальной границы затвердевания и активное перемещение присоединенных масс, плавающих кристаллов и неметаллических включений вниз. Второй период связан со смыканием присоединенных слоев и развитием замкнутых конвективных потоков, при которых как плавающие кристаллы, так и неметаллические включения могут обратными потоками перемещаться в прибыльную часть

слитка. В третьем периоде формирования происходит затвердевание оставшихся объемов расплава.

Для изучения влияния на все выше изложенные процессы упругих колебаний, проводилось моделирование процесса кристаллизации в полях вынужденной и гравитационной конвекций на прозрачных средах, затвердевающих в водоохлаждаемых изложницах и вертикальных плоских моделях. В качестве моделирующих сред применялся салол и расплавленный парафин. С целью визуализации потоков, в модельные жидкости вводилась алюминиевая пудра.

На расплаве салола, затвердевающего в тонкой вертикальной плоской модели при гравитационной конвекции, установлено движение двух параллельных потоков - нисходящего, и примыкающего к нему, тонкого восходящего. При введении в расплав легких дисперсных частиц, их перемещение совпадало с направлениями конвекции потоков, однако скорость их движения в зависимости от расстояния до границы затвердевания значительно изменяется. При изучении влияния конвекции на топографию кристаллической структуры, получаемой в водоохлаждаемых изложницах без вибрационного воздействия на расплав, установлено заметное опережение растущих кристаллов в верхней половине слитка и отклонение осей дендрита первого порядка в сторону набегающего конвективного потока. Чем больше скорость конвекции, тем отклонение этих осей от горизонтальной оси больше.

Характерной особенностью изучаемого процесса конвекции в замкнутом объеме является постепенное накопление кристаллов на открытой поверхности расплава и последующее интенсивное опускание дождя кристаллов по всему сечению слитка. Оно, по видимому, связано с выносом восходящими потоками части кристаллов с придонных объемов в прибыльную часть слитка.

Наложение на расплав упругих волн резко изменяет обычную картину кристаллизации сплавов. Вместо медленного перемещения конвективными потоками центров кристаллизации в донную часть изложницы, наступает интенсивное перемешивание расплава даже при частотах вибрации порядка  $\omega = 20$  Гц. При этом приходит в движение не только зона двухфазного состояния, но и весь объем. Видны обломки кристаллов, которые от границы затвердевания перемещались внутрь слитка. Осаждение таких кристаллов на дно изложницы не происходит.

В зависимости от величины разрежения и давления, развиваемых упругой волной, в процессе моделирования конвективных потоков были получены следующие результаты:

1) при малых частотах и амплитудах вибрации зона двухфазного состояния расплава разрушается и плавающие кристаллы в ней начинают перемещаться к оси слитка (рис. 7а);

2) при увеличении частоты колебания вибрируемая среда и зародыши кристаллизации перемещаются по всему объему слитка и находятся в хаотичном состоянии (рис. 7б);

3) в зависимости от частоты колебаний возникают направленные вихревые потоки двух типов: при умеренной частоте колебаний расплав с зародышами опускается вдоль границы затвердевания вниз, а затем по оси слитка поднимается вверх; при увеличении частот колебаний направления потоков меняются наоборот. При этом осаждения кристаллов на дно не происходит.

Теоретический анализ воздействия упругой волны на конвективное движение и перемещение расплава, проведенный на базе теории развития

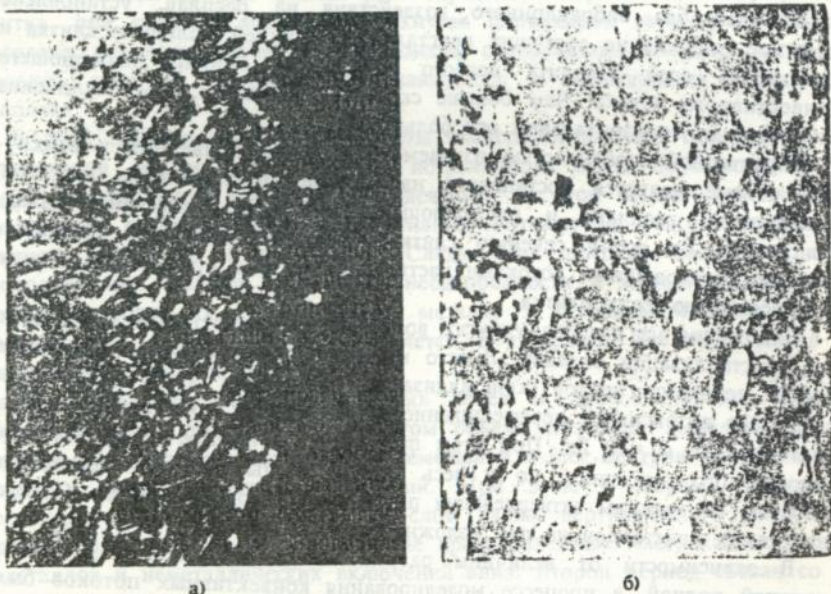


Рис.7 Разрушение кристаллического фронта (а) и перемещение кристаллов в объем слитка (б) при виброобработке затвердевающего слитка

пограничного слоя, позволил раскрыть механизм вибрационного перемешивания расплавов. Установлено, что набегавший на пограничный слой вибрационный поток в период разрежения вызывает отрыв пограничного слоя и развитие возвратного потока, разрушающего нисходящий поток расплава.

#### ГЛАВА 6. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СПЛАВОВ.

Кристаллизационные дефекты, главным образом, возникают в зоне двухфазного состояния сплава. Проведенный в этой главе анализ условий развития этой зоны показал, что наиболее важными параметрами возможного воздействия упругими волнами на затвердевающий расплав имеют два отличных друг от друга вида теплопередачи. Это, прежде всего, отвод тепла перегрева сплава и отвод основного количества тепла, обеспечивающего переход жидкого металла в твердое состояние - тепла кристаллизации сплава. Если первый вид теплопередачи осуществляется непосредственно к границе затвердевшего слоя металла, то второй происходит от плавающего растущего кристалла к жидкой фазе.

Обобщение уже имеющихся экспериментальных литературных данных распределения температурных полей, тепловых потоков и градиентов температур перед границей затвердевания слитков массой 6; 8,6; 9,6; 12,8 т позволило предложить следующую зависимость для определения коэффициента теплопередачи от жидкого металла к твердой фазе:

$$\alpha = \alpha_0 \left( 1 + \frac{7,1}{R_a \cdot \nu^2} \cdot D^2 \Lambda^2 \omega^2 \cos^2(\omega\tau) \right)^{1/4}, \quad (5)$$

где:  $D$ ,  $\Lambda$ ,  $\omega$  - диаметр слитка, амплитуда и частота вибрации;  $\nu$  - кинематическая вязкость расплава;  $R_a$  - критерий Релея;  $\alpha_0$  - значение коэффициента теплопередачи для условий затвердевания сплава в спокойном состоянии.

При рассмотрении условий роста плавающих кристаллов установлены два возможных случая теплоотвода. Если в процессе роста индивидуальных кристаллов количество выделенной теплоты кристаллизации в жидкой части двухфазной зоны больше возможностей отвода тепла через твердую корочку, то их рост приостанавливается и возможно появление периодических кристаллических структур.

Интенсивность роста и теплоотвода от индивидуальных кристаллов зависит от распределения вокруг них тепловых полей. Естественно, что этот рост в огромном объеме ядра слитка, куда кристалл может попасть

под действием вибрационных сил, принципиально отличается от обычных условий роста в зоне двухфазного состояния. Поэтому одним из сложных вопросов при разработке технологии вибрационной обработки является выбор метода воздействия, типа применяемой для этого волны и места приложения импульса. Влияние ее проявляется не только в условиях роста индивидуальных кристаллов, но и перераспределении ликвирующих элементов и неметаллических включений в объеме слитка. Выбор оптимальных методов вибрации и места приложения импульса зависит от тех задач, которые ставятся перед этим методом обработки и определения рационального распределения сил, действующих на центры кристаллизации и неметаллические включения в сплаве.

При обработке расплавов в основном применяются три вида вибрации: с ориентацией амплитуды в вертикальном или горизонтальном плоскостях и перемещения круговой волны с круговой амплитудой в горизонтальной плоскости.

Анализ действия вибрационных сил показал, что при решении проблемы выбора оптимальных параметров обработки следует учитывать следующие основные возможные принципы воздействия низкочастотных волн на затвердевающий металл:

1) при распространении волны в горизонтальном направлении главные силы и ускорения воздействуют в вертикальном направлении, вызывая перемещение неметаллических включений и легкоплавких оксидов к открытой поверхности металла и опускание плавающих кристаллов и центров кристаллизации в донную часть слитка, способствуя его уплотнению и сокращению глубины усадочной раковины;

2) вертикальное расположение стоячей волны способствует перемещению центров кристаллизации к боковой поверхности слитка, а неметаллических включений - вглубь затвердевающего объема металла;

3) при круговой вибрации в горизонтальном направлении центробежная сила перемещает центры кристаллизации к границе затвердевания, а центростремительная сила сдвигает неметаллические включения, ликваты и легкоплавкие примеси по направлению к оси слитка; касательное направление скорости потока по отношению к границе затвердевания способствует обламыванию вершин растущих дендритов.

Приведенный в этой главе анализ действия вибрационных сил при круговой вибрации показывает существенное изменение давления на центры кристаллизации и неметаллические включения в зависимости от расстояния частицы до оси вращения сосуда с расплавом. Поэтому,

имеющиеся в расплаве плавающие кристаллы и обломки ветвей дендритов двигаются по направлению от оси к поверхности слитка.

Такое направленное движение способствует уплотнению кристаллической структуры под действием центробежных сил и повышению механических свойств поверхностных слоев слитка. По мере накопления плавающих кристаллов в поверхностных слоях слитка температура их резко падает. Следующие слои затвердевающего металла, имеющие меньшую концентрацию центров кристаллизации, охлаждаются с меньшей интенсивностью. Наиболее медленное охлаждение происходит в центральных объемах слитка, из которых обломки ветвей дендритов и плавающие кристаллы перемещаются по направлению к поверхности слитка.

Для изучения интенсивности охлаждения различных слоев слитка было проведено исследование распределения температурных полей при затвердевании слитка салола. Точки для измерения температуры в ходе кристаллизации размещались у поверхности, по середине радиуса и в центре слитка. Наружные слои затвердевающей отливки охлаждаются наиболее интенсивно. Слои расплава, находящиеся по середине радиуса, уже охлаждаются с меньшей интенсивностью. Наименьшая скорость охлаждения наблюдается в центральных объемах слитка.

Так как дисперсность кристаллической структуры находится в прямой зависимости от скорости охлаждения расплава, то можно ожидать, что круговая вибрация в горизонтальной плоскости вызывает значительное изменение размеров кристаллов по сечению слитка от мелких, дисперсных в поверхностных слоях до крупных кристаллов по оси слитка. Такая технология вибрационной обработки может быть полезна для отливок, требующих качественную мелкокристаллическую структуру и высокие свойства поверхностных слоев затвердевающего металла (валки прокатных станов, различные литые детали, имеющие круглое поперечное сечение и др.).

Влияние круговой вибрации на кристаллическую структуру изучали на плоских образцах салола. Установлено, что наименьший размер зерна при круговой вибрации наблюдается в поверхностных слоях слитка.

Влияние круговой и вертикальной вибраций на структуру и свойства изучали на стальных слитках массой 1 и 2 т, отливаемые сверху в чугунные изложницы. В результате исследований высокоуглеродистой стали в 3,5 раза, предела текучести на 18 %, предела прочности на 5,8 % и твердости на 10,6%. В слитках, подвергшихся вертикальной вибрации, эти показатели изменялись в пределах 1-3,5%. За счет уплотнения

металла объем усадочной раковины уменьшился на 7,2 %. Одновременно были отмечены более равномерное распределение неметаллических включений и существенное уменьшение газовых пор в слитке.

Одним из главных результатов исследования явилась зависимость указанных показателей качества от начала вибрации после заливки в изложницу и места приложения импульса (расположение вибратора). Оно связано с торможением распространения вращательного импульса вследствие возникновения силы вязкого трения расплава в донной части изложницы и развитием конвективного движения в вертикальном направлении слитка.

Моделирование процессов затвердевания в условиях наложения упругих волн подтвердило существенную роль выбора места и способа подвода вибрационного импульса в получении благоприятной кристаллической структуры и свойств литья.

В этой главе предложены рекомендации по выбору метода воздействия на затвердевающий расплав и месту приложения вибрационной волны к обрабатываемому слитку.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан ряд экспериментальных установок и физических моделей для изучения процессов неравновесного роста кристаллов в спокойном состоянии затвердевающего расплава и в условиях развития естественной конвекции в поле упругих колебаний сплавов из органических материалов, алюминия и стали.

2. Рассмотрены особенности неравновесного роста кристаллов с учетом микромассопереноса, вызываемого усадкой сплава, термокапиллярной и термоконцентрационной конвекциями в междендритном пространстве затвердевающего сплава. Уточнено влияние его на величину эффективного коэффициента диффузии, распределения ликвирующих примесей и морфологию кристаллической структуры слитка. При этом был раскрыт механизм влияния межфазного термокапиллярного взаимодействия на формирование структуры слитка.

3. Приведены результаты изучения условий формирования кристаллических структур в поле упругих колебаний на моделях с плоскими образцами. Выявлено разрушение неравновесных форм кристаллов и эффективное измельчение структуры литья в зависимости от частоты и амплитуды колебаний.

При наложении вибрации на затвердевающие слитки, температура внутри его ядра выравнивается по всему сечению. Скорость охлаждения

расплава возрастает с увеличением частоты и амплитуды вибрации. Протяженность зоны столбчатых кристаллов и размер зерна с увеличением частоты и амплитуды колебаний уменьшается, а плотность слитка увеличивается.

4. Изучение эффективности вибрационной обработки стальных слитков из стали 35Л и 55Л показало существенное влияние ее на макро- и микроструктуру литья, форму и расположение неметаллических включений, плотность и механические свойства литой стали. Вибрационная обработка стальных слитков с частотой  $\omega = 47$  Гц и амплитудой  $A = 0,6$  мм увеличивает твердость литой структуры на 30-40%, а предел прочности и предел текучести на 15-17%.

5. Рассмотрено распределение сил, действующих на центры кристаллизации и неметаллические включения, находящиеся в замкнутом пространстве при наложении стоячих и сферических волн, создаваемых волноводом. Раскрыт механизм разрушения кристаллов в поле упругих волн и выявлены причины измельчения кристаллической структуры сплавов.

6. Раскрыт механизм формирования периодических структур, связанный с периодическим накоплением по ходу затвердевания на межфазной границе первого слоя газовых кавитационных пузырьков, которые при схлопывании разбрасывают перед фронтом затвердевания мельчайшие кристаллы, образующие второй слой периодической кристаллизации сплавов.

Теоретический анализ распределения температурных полей и давлений в зоне кавитации позволил получить количественную зависимость для определения значений вибрационных сил, кавитационного давления и сил вязкого сопротивления, действующих на кристаллы в процессе их перемещения в поле упругих волн.

7. Изучена закономерность развития периодических кристаллических структур и периодически повторяющихся шнуров химической зональной неоднородности на макротемплетах десяти наиболее распространенных стальных слитков массой от 6 до 142 т и установлена их связь с теплофизическими условиями затвердевания стали и развитием процессов термокапиллярного массопереноса ликвирующих элементов.

Анализ этих явлений на большом количестве слитков позволил выявить влияние на развитие химической неоднородности, температуры разливаемой стали, способа подвода металла к изложнице, отношения диаметра слитка к диаметру прибыли и ряд других параметров разливки стали.

8. Приведены результаты анализа развития естественной конвекции на границе затвердевания слитка массой 142 т. Установлена зависимость для определения критической толщины незатвердевшей части слитка, в которой происходит переход от последовательного перемещения пограничного слоя к замкнутым циркуляционным потокам расплава во всем объеме слитка. В результате анализа теплофизических условий затвердевания слитков установлено, что интенсивность передачи тепла от пограничного слоя на нижнем горизонте на 1-1,5 порядка выше, чем на верхнем.

9. Разработаны методы и четыре типа установок для моделирования процессов кристаллизации в условиях конвективного движения расплава. При этом установлено:

- наличие нисходящего и восходящего конвективных потоков в замкнутом пространстве;

- существенное отклонение осей дендритов первого порядка в сторону набегающего потока;

- наложение вибрации на расплав приводит к разрушению зоны двухфазного состояния и перемешиванию плавающих кристаллов по всему объему слитка, способствуя тем самым объемной кристаллизации сплава;

- раскрыт механизм разрушения пограничного слоя под действием упругих волн и возникновение процесса перемешивания сплава.

10. Показана зависимость кристаллической структуры при вибрации расплава от типа применяемой волны. Противоречивые результаты, полученные различными исследователями при вибрационной обработке, связаны с нерациональным выбором метода и места подвода вибрационного импульса.

Рассмотрение баланса и расположения вибрационных сил при обработке расплава упругими волнами в вертикальном, горизонтальном и тангенциальном направлениях позволило разработать теоретические основы для выбора рациональной схемы обработки затвердевающих расплавов в зависимости от следующих целей: измельчения и уплотнения кристаллической структуры, удаления неметаллических включений, получения объемной кристаллизации сплава, обеспечения дисперсной кристаллической структуры и повышенной плотности поверхностных слоев слитка, повышения выхода годного и механических свойств металла.

Разработанные методы вибрационной обработки могут быть рекомендованы для получения многослойных крупногабаритных гильз, сосудов высокого давления, многослойных труб малого диаметра, для повышения

износостойкости поверхностного слоя валков прокатных станов и других литых деталей машин.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1.Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов. - М.: Металлургия. 1995, 272 с.

2.Эльдарханов А.С. Процессы кристаллизации в поле упругих волн. - М.: Металлургия. 1996, 256 с.

3.Эльдарханов А.С. Механизм образования мелкозернистой структуры при действии вибрации в процессе кристаллизации расплава. - Диссертация кандидата технических наук. - Грозный, 1985. - 173 с.

4.Эльдарханов А.С., Акаев А.А., Мусаев У.О. Механизм влияния упругих колебаний на формирование кристаллической структуры. - Грозный: ГНИ, 1987, 54 с.

5.Эльдарханов А.С. Исследование условий роста кристаллов в поле упругих волн//Процессы литья. 1995, N4, с. 49-59.

6.Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Влияние вибрации на теплофизические особенности затвердевания слитков//Процессы литья, 1995, N3, с.30-41.

7.Эльдарханов А.С. Кавитационное разрушение границы затвердевания//Процессы литья, 1996, N2, с.27-40.

8.Межидов В.Х., Асхабов Х.И., Эльдарханов А.С., Щупак Ю.Д. Влияние вибрации на кристаллизацию органического слитка. -В кн.: Влияние внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся металл. Киев: ИПЛ АН СССР, 1983, с.35-40.

9.Межидов В.Х., Эльдарханов А.С. Структурные неоднородности образовавшиеся при действии упругих колебаний на кристаллизующийся расплав. - В сб. : Тезис докладов Всесоюзной технической конференции " Пути развития научно-технического прогресса в НГП ". ( Грозный - 1986.) М.: ЦПНТО НГП им. Губкина. 1986, с.122.

10.Эльдарханов А.С., Арсанов А.М., Баталов М.А. Улучшение свойств сталей Ст35л и Ст55л действием вибрации в процессе кристаллизации. - В сб. : Тезисы докладов XII Республиканской научной-практической конференции Дагестана. Махачкала, 1988, с.86.

11.Ефимов В.А., Баранова В.Н., Эльдарханов А.С., Арсанов А.М. Макро- и микроструктуры стальных слитков, полученных в условиях действия низкочастотной вибрации. - В кн. : Проблемы стального слитка. Киев: ИПЛ АН УССР, 1988.

12. Эльдарханов А.С. Анализ развития вибрационных сил при кристаллизации сплавов//Процессы литья. 1996, N1, с.83-92.
13. Баталов М.А., Эльдарханов А.С.//Процессы разливки, модифицирования и кристаллизации стали и сплавов. - Волгоград, 1990, ч.1, с.35-37.
14. Эльдарханов А.С., Баталов М.А. Исследование эффективности действия различных видов вибрации на структуру и свойства кристаллизующегося стального слитка. - В сб.: Процессы разливки, модифицирования и кристаллизации стали и сплавов. - Волгоград, 1990, ч.1, с.23-26.
15. Эльдарханов А.С. Выбор оптимальных параметров вибрационной обработки затвердевающих сплавов// Процессы литья. 1994, N3, с.42-49.
16. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Периодическая кристаллизация стали//Процессы литья. 1995, N1, с.52-62.
17. Эльдарханов А.С. Развитие периодических структур при затвердевании стали//Процессы литья, Киев: ИПЛ НАН Украин, 1995, N2, с. 48-56.
18. Эльдарханов А.С., Мусаев У.О. Характерные структуры, образующиеся при действии вибрации на кристаллизующийся расплав. - В сб.: Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции. Грозный, 1982, с.80.
19. Эльдарханов А.С., Мусаев У.О. К теории образования периодических кристаллических структур при действии вибрации. - В сб.: Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции. Грозный, 1985, с.97.
20. Межидов В.Х., Эльдарханов А.С. Влияние частоты на периодичность кристаллической структур. В кн.: Интенсификация технологических процессов в ультразвуковом поле. МИСиС, М.:Металлургия, 1986, с.125-127.
21. Межидов В.Х., Эльдарханов А.С. Механизм формирования периодической структуры в плоских препаратах с переохлажденным расплавом. В кн.: Формирование стального слитка. М.:Металлургия, 1986, с.45-47.
22. Межидов В.Х., Эльдарханов А.С. Влияние параметров вибрации на периодические структуры, образованные кавитацией// Физика и химия обработки материалов. М.: Наука, 1986, N5, с.152-155.
23. Мусаев У.О., Эльдарханов А.С. Влияние частоты вибрации на скорость перемещения кристаллического фронта переохлажденного расплава. - В сб. : Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции. Грозный, 1982, с.82.
24. Эльдарханов А.С., Межидов В.Х., Мусаев У.О., Баталов М.А. Механизм действия упругих колебаний на измельчение кристаллической

структуры в процессе затвердевания расплавов. - В сб.: Тезисы докладов VIII Всесоюзной конференции " Новые высокопроизводительные технологические процессы, высококачественные сплавы и оборудование в литейном производстве ". Каунас, ИПЛ; 1986, с.347-348.

25.Эльдарханов А.С. Периодическая кристаллизация при моделировании процесса затвердевания металлических сплавов// Процессы литья. 1994, N4, с.64-72.

26.Акаев А.А., Эльдарханов А.С.,Султыгов М.С. Механизм измельчения кристаллической структуры при наложении упругих колебаний в процессе затвердевания. - В сб.: Доклады Всесоюзной конференции "Проблемы комплексного освоения нефтяных и газовых месторождений ". - М.: 1984, с.222.

27.Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Исследование условий роста кристаллов в поле упругих волн. - В сб.: " Обработка легких и специальных сплавов ". - М.: ВИЛС, 1996, с.209-218.

28.Межидов В.Х., Эльдарханов А.С., Мусаев У.О. Образование периодических кристаллических структур при действии вибрации в процессе затвердевания. - В сб.: Физика межфазных явлений. - Нальчик: КБГУ, 1985, с.117-120

29.Межидов В.Х., Мусаев У.О., Эльдарханов А.С. Способ определения концентрации газа в жидкости. А.С. N 1430845 от 15.06.88.

30.Ефимов В.А., Баталов М.А., Эльдарханов А.С. Способ получения слитка. А.С. N 1770070 от 22.06.92.

#### АННОТАЦИЯ

ЭЛЬДАРХАНОВ А.С. Применение физических методов моделирования для изучения влияния вибрации на процессы затвердевания сплавов. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 "Металлургия черных металлов". Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, 1996 г.

Защищаются методики для изучения неравновесных форм роста кристаллов на физических моделях с применением прозрачных сплавов и закономерности влияния микроконвективных, термокапиллярных и термоконцентрационных процессов массопереноса на структуру поверхности раздела фаз и механизм перемещения ликватов на границу затвердевания сплавов. Особенности кристаллизации сплавов в условиях термической и вынужденной конвекции при отливке слитков и закономерности развития пограничных слоев и присоединенных масс при конвективном

движении расплава вдоль границ затвердевания и вызываемых ими изменений в кристаллической структуре литья.

Защищается механизм кристаллизации сплавов и закономерности влияния теплофизических условий на формирование зональной химической и кристаллической неоднородностей при затвердевании больших масс расплавов, а также особенности процесса послойного роста кристаллов и теоретическое обоснование периодической кристаллизации сплавов в поле упругих колебаний.

Предложены теоретические основы выбора эффективных технологий и оптимальных режимов вибрационной обработки сплавов вертикальной, горизонтальной и горизонтально-круговой вибрацией.

Результаты работы опубликовано в двух монографиях, 30 статьях и защищено 2 авторскими свидетельствами.

Ключевые слова: слиток, вибрация, кристаллическая структура, периодичность, массоперенос, ликваты, пограничный слой.

#### АНОТАЦІЯ

Ельдарханов А.С. Застосування фізичних методів моделювання для вивчення впливу вібрації на процеси твердження сплавів. Дисертація на здобуття ученого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 "Металургія чорних металів".

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, 1996.

Захищаються методики для вивчення нерівноважних форм росту кристалів на фізичних моделях з застосуванням прозорих сплавів закономірності впливу мікроконвективних, термокапілярних та термоконцентраційних процесів масопереносу на структуру поверхні розділення фаз і механізм переміщення ликватів на границю твердження сплавів. Особливості кристалізації сплавів в умовах термічної та вимушеної конвенції при відливанні зливоків та закономірності розвитку пограничних шарів приєднаних мас при конвективному русі розплаву вздовж границі твердження і зміни, які викликаються ними в кристалізаційній структурі литва.

Захищається механізм кристалізації сплавів, закономірності впливу теплофізичних умов на формування зональної хімічної та кристалізаційної неоднорідностей при твердненні великих мас розплаву, а також особливості процесу пошарового росту кристалів і теоретичне обґрунтування періодичної кристалізації сплавів у полі пружних коливань.

Запропоновано теоретичні основи вибору ефективних технологій і оптимальних режимів вібраційної обробки сплавів вертикально, горизонтально та горизонтально-коловою вібрацією.

Результати роботи опубліковано у двох монографіях, 30 статтях та захищені двома авторськими свідоцтвами.

Ключові слова: зливков, вібрація, кристалічна структура, періодичність, масоперенос, ліквати, пограничний шар.

#### ANNOTATION

A.S.ELDARCHANOV Applying of physical modeling methods for investigation of vibration influencing on processes of alloys crystallization. Dissertation on grade of doctor of technical sciences on speciality 05.16.02 "Ferrous metals metallurgy".

Physical-technical institute of metals and alloys NAS of Ukraine, Kijv, 1996.

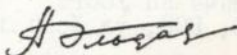
Defend methodics for investigation of non-equilibrium forms of of crystals grows on physical models with applying of transparencies alloys and rules of influencing microconvecting, thermocappilar and thermoconcentrating processes of mass-transfer on the structure of phases dividing surfase and mechanism of licvates migration on border of alloys crystallization. Especialities of alloys crystallization in conditions of thermal and reinforcement convection during ingots casting and just entrapping masses during melt's convecting movement in length of crystallization border and varieties in crystal structure of casting influencing by them.

Defend mechanism of crystallization of alloys and rules of influencing of thermal-physical conditions on forming zonal chemical and crystal phase inequalities during solyidification of great melt masses and especialities of proces layer grows of crystals and theoretical foundation of periodical crystallization of alloys in the field of the other vibration movements.

Introduced theoretical bases of choice of effective technologies and optimal regimed of vibration treatment of alloys by vertical, horizontal and horizontal-rotor vibration.

Results of investigations was published in two monographies, 30 papers and defended by the author certifications.

Key words: ingot, vibration, crystal structure, periodity, mass-transfer, licvates, border layer.



Подп. в печ. 22.05.96. Формат 60x84/16. Бум. офс.  
Печ. офс. Усл. печ. л. 2,81 . Усл.кр.-отт. 2,8 .  
Уч.-изд.л. 2,04 . Тираж 106 экз. Заказ 325 .

Институт проблем материаловедения  
им. И.А. Францевича АН УССР.  
252680 Киев 680, ГСП, ул.Кржижановского,3.

Участок оперативной полиграфии  
Института проблем материаловедения  
им. И.А. Францевича АН УССР.  
252680 Киев 680, ГСП, ул.Кржижановского,3.

436434

**AB 35.054**