

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

Д. Г. ЧЕРНИКОВ

ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» в качестве конспекта лекций для студентов, обучающихся по основной образовательной программе высшего образования по направлениям подготовки 150400.62 Metallургия, 150700.62 Машиностроение

САМАРА
Издательство СГАУ
2013

УДК 620.22 (075)
ББК 30.3я7
Ч-492

Черников, Д.Г.

Ч-492 **Технология конструкционных материалов:** конспект лекций /
Д.Г. Черников. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2013. –
56 с.

Рассмотрены перспективные физические способы воздействия на расплавы с целью повышения качества литого металла, изложены основы строения расплавов на основании ведущих теорий и моделей.

Лекции предназначены для студентов инженерно-технологического факультета, обучающихся по направлению подготовки 150400.62 «Металлургия», изучающих дисциплину «Технология конструкционных материалов» в 4 семестре; 150700.62 «Машиностроение», изучающих дисциплину «Технология конструкционных материалов» в 4 семестре.

Подготовлено на кафедре обработки металлов давлением.

УДК 620.22 (075)
ББК 30.3я7

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРОЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ	6
2 СУЩЕСТВУЮЩИЕ СПОСОБЫ ФИЗИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАСПЛАВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МОДИФИЦИРУЮЩЕГО ЭФФЕКТА	19
2.1 Механические способы воздействия на расплав	20
2.2 Тепловые способы воздействия на расплав	25
2.3 Барометрические способы воздействия на расплав	26
2.4 Высокэнергетические способы воздействия на расплав	28
2.5 Электромагнитные способы воздействия на расплав	31
2.5.1 <i>Обработка расплава электрическим током</i>	31
2.5.2 <i>Обработка расплава электромагнитными полями</i>	33
3 МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА РАСПЛАВОВ	37
3.1 Параметры магнитно-импульсной обработки расплава	37
3.2 Основные технологические схемы магнитно-импульсной обработки расплава.....	39
3.3 Силовой фактор магнитно-импульсной обработки расплава	43
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	47

ВВЕДЕНИЕ

В наш век глобальной механизации и автоматизации люди находят всё новые и новые способы для улучшения и облегчения труда. Повсеместное развитие и внедрение новейших технологий становится обыденным. Вместе с тем растёт требовательность потребителей к качеству продукции. Изобретаются новые методы производства, новое более сложное оборудование, более сложные технологические процессы. Наиболее далеко в век современных технологий шагнуло машиностроение. В современной промышленности доля машиностроения доходит до 40%. Машиностроение является на данный момент фундаментом для всей мировой промышленности. Машиностроение создает машины и оборудование, аппараты и приборы, различного рода механизмы для материального производства, науки, культуры, сферы услуг. Однако машиностроение не может обойтись без сырьевой базы и металлургии в частности. В мировой промышленности металлургия занимает около 7 %.

В металлургии, как и в остальных отраслях технологии производства не стоят на месте, а получают всё большее развитие. Повышаются требования к чистоте металла, к механическим характеристикам сплавов находящих широкое применение в машиностроении. Повышаются требования к качеству отливок. В связи с этим всё больший процент отливок получают специальными способами литья (в оболочковые формы, по выплавляемым моделям, в кокиль, под давлением, центробежное литье, и др.). Доля специальных способов литья в современной промышленности достигает 20%, а в некоторых странах и выше. В современной мировой промышленности по объёму использования специальных способов литья можно судить о технической развитости стран!

Но не только использованием новых видов литья добиваются повышения качества продукции. В настоящее время всё больше исследований проводят в сфере усовершенствования существующих и

создания новых методов обработки металла в жидком состоянии. Эти методы повышения качества отливок можно внедрять, как и в традиционные виды литья, так и в специальные, поэтому разработка подобных способов является весьма перспективной.

Во многих работах было показано, что физические методы обработки расплавов обладают существенными преимуществами по сравнению с традиционными технологиями плавки и литья. Так, физические методы обработки расплавов способствуют получению мелкозернистой структуры и повышенных технико-эксплуатационных свойств отливок, не загрязняя при этом химический состав литейных сплавов нежелательными примесями при дальнейших переплавах.

1 СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРОЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ

С давних пор, людям известно о возможности плавления металлов. Постепенно люди научились плавить множество металлов и изобретали всё новые и новые технологии, позволяющие получить из куска руды необходимое металлическое изделие. И по сей день плавление и кристаллизация металлов, относятся к ежедневным, повторяющимся процессам литейного производства. Однако наряду с этим плавление и кристаллизация металлов, являются основополагающими процессами литья. В процессе каждой плавки формируются литейные сплавы, их структура и свойства. В современной промышленности известны множество способов получения и улучшения литейных сплавов. В них добавляют модификаторы, раскислители и легирующие элементы, при этом изменяя состав получаемых сплавов, а вместе с тем изменяя его свойства и структуру. Эти простые операции знакомы любому литейщику и проводятся изо дня в день, однако мало кто пытался объяснить процессы, происходящие при проведении этих операций. Процессы плавления и кристаллизации в существующей литературе описываются с термодинамической точки зрения. Однако термодинамика не может нам рассказать о механизме явлений происходящих при плавлении и кристаллизации сплавов, описывая процессы лишь на макроуровне.

Современные представления о структуре расплавов основаны на теории микронеоднородного строения жидкостей. Ведущую роль в этом вопросе имеют работы Я.И. Френкеля [1, 2] и В.И. Данилова [3], в которых установлена близость структур и основных физических свойств твердых и жидких металлов.

Я.И. Френкель предложил дырочную теорию строения расплава. Он установил, что при плавлении удельный объем металлов увеличивается на 3-10%. Это позволило предположить, что внешняя целостность жидкости

является до некоторой степени кажущейся. Жидкость как бы пронизана множеством поверхностей разрыва. В результате образуются «дыры», которые спонтанно закрываются в одних местах, возникая при этом в других. Автор определил время «оседлой жизни» атома или время, в течение которого атом колеблется около положения равновесия, составляющее $\tau = 1,3 \cdot 10^{-12}$ с [1].

Доказательством взаимосвязи свойств жидких и твердых металлов являются результаты дифракционных исследований и определения основных физических свойств расплавов (электросопротивления, вязкости, плотности, поверхностного натяжения) зарубежных ученых [4 – 8]. По мнению авторов [9] именно результаты дифракционных исследований, а также физических свойств позволили отвергнуть представления о бесструктурности жидкого состояния.

Стюартом и Эйрингом была разработана теория сиботаксисов. Авторы допускали, что упорядоченное размещение частиц в жидком состоянии не ограничивается непосредственными соседями. Упорядоченность в расположении частиц может простираться на большие объемы или группы, названные сиботаксисами (греч. – ковчег). Сиботаксисы не являются неизменными во времени. Они непрерывно зарождаются и разрушаются. Сиботаксис не имеет физической границы раздела. Расплав по этой теории объясняется как гомогенная система [10, 11].

Развивая дырочную и сиботаксическую модель жидкого состояния, авторы [12, 13.] практически одновременно предложили квазикристаллическую модель строения металлических расплавов. Согласно этой модели впервые расплавы представляют собой сочетание двух структурных составляющих: кластеров и разупорядоченной зоны. Под кластерами, в данном случае, понимали микрогруппировки с упорядоченным расположением атомов, близким к таковому в кристаллических телах, а под разупорядоченной зоной – хаотическое, «рыхлое» расположение частиц в межкластерном пространстве.

Квазиполикристаллическая модель строения расплавов получила свое развитие в работах В.И. Архарова, И.А. Новохатского, В.З. Кисунько в 1970-1980 годах [14 – 20]. Согласно этой модели кластерная и разупорядоченная зоны являются короткоживущими образованиями ($10^{-7} - 10^{-9}$ с). Между этими зонами отсутствуют четкие границы раздела, благодаря плавному сопряжению их структур. В соответствии с основными положениями данной модели бинарные расплавы в зависимости от типа фазовой диаграммы конкретной системы включают двухструктурные и трехструктурные зоны [15, 18 – 20]. Бинарный расплав из изоморфных компонентов *A* и *B* состоит из разупорядоченной зоны переменного состава и кластеров типа твердого раствора. Расплавы эвтектических систем включают разупорядоченную зону переменного состава, кластеры на основе компонента *A* и кластеры на основе компонента *B*. Такую структуру называют квазиэвтектической. Распространяя это положение на многокомпонентные эвтектические системы, авторы работы [19] считают, что каждому виду твердой фазы отвечают близкий по составу кластер жидкости, а кластерный набор исходного расплава можно предсказать по результатам фазового анализа литых сплавов.

По мнению И.А. Новохатского [20], упаковка атомов в кластерах жидких металлов довольно совершенна и подобна кристаллической и, следовательно, возможно перенесение некоторых свойств кристаллического состояния на кластеры жидкости.

Подчеркивая, что квазиполикристаллическая модель представляет собой один из вариантов дальнейшего развития сиботаксической модели жидкости в [21] отмечаются некоторые существенные различия: продолжительность жизни кластеров много больше продолжительности одного цикла термических колебаний атомов в нем; межкластерная зона с хаотическим расположением атомов рассматривается как отдельная структурная составляющая расплава.

Иной механизм формирования микронеоднородности расплава предложен в работах И.В. Гаврилина [22 – 26]. Автор считает, что структура жидких литейных сплавов возникает в процессе плавления шихтовых материалов [25].

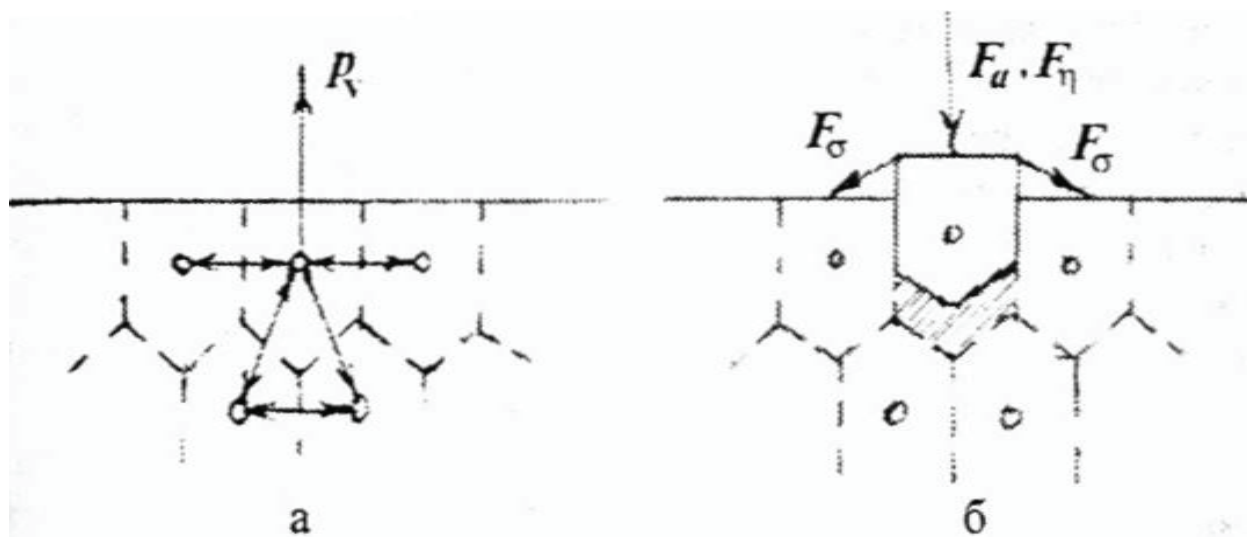
Он описывает механизм протекания процесса плавления металлов, через множество единичных актов плавления. Ранее представления о плавлении металлов, были объяснены тем, что при нагреве, атомы твёрдого вещества переходят в жидкость. Но это объяснение не корректно в виду того, что отдельным атомам в структуре металла не присуще изменение агрегатного состояния. Изменение агрегатного состояния присуще лишь отдельным структурным элементам вещества и элементам пространства.

Согласно теории Гаврилина, образование таких элементов вещества из общей структуры металла и является элементарным актом плавления. В работе [22] было рассказано о том, что двумя основными факторами, приводящими к плавлению, являются, с одной стороны, нарастание давления газа вакансий, а с другой – падение прочности металлов и сплавов с ростом температуры. Известно, что наличие вакансий в кристаллической решетке сильно искажает её. Потенциал взаимодействия вакансий в кристаллической решетке имеет форму затухающей периодической функции. Это значит, что вакансии ведут себя подобно колеблющемуся маятнику, что приводит к неминуемому сближению вакансий. Поэтому можно предположить, что между вакансиями, так же как и атомами существуют силы притяжения и отталкивания. Предполагается, что при сообщении вакансии достаточной энергии и достижении вакансии энергии активации, вакансии могут преодолеть силы отталкивания и слиться в единые комплексные соединения вакансий.

Однако большинство вакансий не приобретают достаточной энергии активации и не могут преодолеть барьер отталкивания, т.е. можно утверждать, что подавляющее большинство вакансий в кристаллической решетке металлов и сплавов при сближении отталкиваются друг от друга.

Это отталкивание и создает давление газа вакансий. С ростом температуры концентрация вакансий, с недостаточной энергией для активации, в металлах повышается, они чаще сталкиваются и давление газа вакансий с ростом температуры возрастает. Но при нагреве до определённой температуры, вакансиям сообщается лишь определённое количество энергии, которого не хватает для продолжения сближения и объединения больших групп уже соединённых вакансий. Таким образом, при определенной температуре концентрация вакансий достигает некоего критического предела. Одновременно прочность металлов и сплавов падает до величины, равной давлению газа вакансий. При этой температуре и начинается плавление.

Элементарный акт плавления по Гаврилину И.В. состоит в том, что область кристалла, окружающая одну вакансию (каждую вакансию), частично отделяется от кристалла под давлением газа вакансий. Схема элементарного акта плавления показана на рисунке 1.1. На рисунке 1.1 а), показано исходное состояние участка кристаллической решетки с вакансиями перед элементарным актом плавления, на рисунке 1.1 б) – состояние того же участка после частичного отделения области, окружающей единичную вакансию, от кристалла.



а – стадия формирования активной силы давления газа вакансий p_v , выделяющей кластер из твёрдого состояния; б – стадия формирования реактивных сил, возвращающих кластер в исходное положение: поверхностные силы F_c ; силы вязкого трения F_0 , силы внешнего давления F_a .

Рисунок 1.1 – Схема элементарного акта процесса плавления металлов с образованием единичного кластера и единичного межкластерного разрыва

Однако сразу после отделения этой области кристалла между ней и теми областями, что на рисунке 1.1 б) показаны снизу, образуются щелевидные пустоты – области разрывов межатомных связей. При этом выталкивающее давление газа вакансий на данную область с момента образования разрыва снимается, исчезает. В то же время, как видно из рисунка, на отделившуюся область действуют и реактивные силы – силы внешнего давления (если оно есть), сила вязкого трения и сила поверхностного натяжения – она есть всегда. Эти силы возвращают отделившуюся область в исходное положение. После чего в исходном положении вновь возникает давление газа вакансий, область частично отделяется, потом вновь возвращается под действием реактивных сил, и процесс переходит в колебательный. Эту отделившуюся часть кристалла,

профессор Гаврилин называет «Кластер». По его теории кластер присущ только данному (жидкому) агрегатному состоянию, а образующаяся полость между кластерами, называемую «межкластерный разрыв» это структурная единица пространства.

Кластер в момент своего образования приобретает собственное колебательное движение. Именно это объясняет известный факт поглощения металлами и сплавами при плавлении большого количества тепла без изменения температуры тела. Известно, что это возможно только в том случае, если система приобретает новые степени свободы, т.е. новые виды движения. Колебательное движение кластеров и атомов в них и есть такой новый вид движения или новые степени свободы для металла в жидком состоянии.

При решении систем уравнений был дан ответ на важный вопрос: «Какова же амплитуда колебаний кластеров и отрывается ли он полностью от твёрдого тела?». Получено, что максимальное отклонение кластеров от исходного положения в момент их образования имеет порядок $0,1-1,0 \text{ \AA}$. Это существенно меньше размеров одного атома и примерно равно или больше предельной теоретической деформации вещества при растяжении. Удаление на $0,1-1,0 \text{ \AA}$ достаточно для кратковременного разрыва межатомных связей кластера с остальной массой твердого металла в плоскости, перпендикулярной направлению движения кластера. В свою очередь, это направление задаётся направлением действия движущей силы процесса плавления – давлением газа вакансий на данный участок кристалла. Из полученных цифр также следует, что кластеры в момент их образования остаются каждый на своем месте и спонтанного перемешивания жидкости в момент её образования не происходит, так как величина их отклонения намного меньше их размера. Гаврилин так же приводит примерный размер кластера. Расчёт показывает, что в состав кластеров при плавлении входят порядка тысячи атомов, а их размер в среднем равен $1 - 10 \text{ нм}$.

Из предложенной теории плавления металла, можно сделать вывод о продолжительности жизни структурной составляющей расплава – «Кластере». Так как движения кластеров приобретают характер незатухающих колебаний, из-за того, что при плавлении мы придаём металлу тепловую энергию металлу, то единица структуры расплава «Кластер» может существовать до тех пор, пока существует расплав. Или иными словами, кластер существует, пока мы сообщаем металлу тепловую энергию, которая расходуется на придание вакансиям энергии активации, а, следовательно, поддержания условий при которых создаётся давление вакансий, приводящее к колебанию кластеров.

Автор подчеркивает, что кластеры – это не микрокристаллы, не остатки твердой фазы в жидкости, а структурные единицы жидкого состояния, возникающие в момент плавления [27]. И.В. Гаврилин рассматривает плавление не как взрывной, а как плавный, последовательный процесс, в результате которого на микроуровне граница раздела твердой и жидкой фаз повторяет, воспроизводит морфологию структуры твердого тела, создавая предпосылки «репродукции» в жидкости структуры и состава исходного твердого тела.

Такой подход, получивший название вакансионно-кластерной модели процесса плавления и жидкого состояния, позволил по известным значениям теплоты плавления и испарения, типу упаковки в кристалле и предельной теоретической деформации при растяжении вещества рассчитать среднее число атомов в кластере, размеры кластеров и изменение объема металла при плавлении [24]. Здесь же определено время жизни кластера, которое составляет для различных металлов 10^{-7} - 10^{-8} с. Полученные значения на несколько порядков превышали время существования тепловых флуктуаций в моноатомной модели жидкого состояния.

Развитие вакансионно-кластерной модели позволило И.В. Гаврилину разработать новые методики изучения химической и структурной неоднородности расплавов [25, 27, 28]. Данные методики, основанные на

седиментации расплавов под действием гравитации в процессе выстаивания, позволили объяснить явления расслоений расплавов чугунов, бронз, силуминов и др. в состоянии полного покоя. Постоянное взаимодействие одноименных кластеров приводит к образованию в расплаве временных конгломератов, состоящих из 10 – 100 и более кластеров. Образование конгломератов и увеличение их размеров способствовало усилению микронеоднородности и успокоению ликвации. При этом в расплаве формировалась структурная и химическая неоднородность с образованием кластеров размерами до 10^3 нм и различием в концентрации компонентов на 10-40% от исходного состава.

Положение о микронеоднородном строении расплавов получило существенное развитие в работах [29, 30]. Авторы особое внимание уделяли рассмотрению генетической связи между структурой и свойствами жидких и твердых металлов. С позиции кластерной теории изучали процессы плавления металлов. Особо подчеркивалось, что жидкий металл – это не механическая смесь атомов или группировок из них (кластеров), а среда, состоящая из взаимодействующих структурных единиц [29]. Кроме кластеров, образующихся на основе микроструктурной неоднородности и генетически связанных с твердым телом, имеются кластеры, образующиеся на основе химического взаимодействия атомов отдельных элементов. Авторами [29, 30] сформулированы важные положения: расчеты не подтвердили существования в жидкостях самостоятельных разупорядоченных зон, в которых находятся отдельные разрозненные кластеры; время существования кластера ограничено и зависит от состава жидкости и температуры; структура жидкости характеризуется наиболее вероятным кратчайшим расстоянием r_l и числом ближайших соседей z_l , а также размерами кластеров $r_{кл}$. На основании этого авторы считают, что в жидкости, как и в твердом состоянии, существует микрогруппировки со структурой ОЦК и ГЦК решеток.

Существенный вклад в развитие теории микронеоднородного строения расплавов внесли работы Б.А. Баума, Г.В. Тягунова [31, 32 – 34]. Результаты дифракционных исследований и испытаний структурно-чувствительных характеристик расплава [31, 32] позволили сформулировать основные постулаты квазихимической модели строения расплавов [34]: расплав состоит из микрообластей – кластеров, расположение атомов в которых характеризуется некоторой упорядоченностью – ближним порядком; кластеры не имеют четких границ. Время существования равновесного кластера ограничено и зависит от состава (от типов химических связей) и температуры. Возможно одновременное существование кластеров двух и более типов упорядочения; энергетическая неравноценность межатомных взаимодействий разного типа является причиной возникновения кластеров разного строения и состава, обладающей разной устойчивостью во времени.

В квазихимическом варианте модели микронеоднородного строения расплава сделан акцент на неравноценность межатомных связей в качестве причины микронеоднородности. Кроме того, данная модель допускает длительное существование отдельных кластеров в расплаве.

Развитие квазихимической модели позволило П.С. Попелю разработать коллоидную модель строения расплавов, имеющую существенные отличия от предыдущих [35, 36 – 39]. Модель строения расплавов, представленная профессором, разработана для объяснения процессов плавления эвтектических сплавов Al-Si. Коллоидная модель предполагает наличие в расплаве коллоидной частицы и дисперсной среды. То есть, при плавлении металла, образуется вначале неравновесный, а затем – метастабильный микрогетерогенный расплав, в котором дисперсные частицы, обогащенные одним из компонентов, взвешены в дисперсионной среде иного состава. На примере сплава Al-Si: в расплаве существует частица, состоящая из атомов алюминия и кремния, но при этом пересыщенная кремнием, а дисперсная среда это истинный раствор кремния в алюминии. То есть кристаллическая решётка таких коллоидных систем насыщена атомами кремния, что по

средствам распределения энергии межатомных связей создаёт на границе системы с дисперсной средой, избыточную свободную энергию. Данная энергия является аналогом обычного межфазного натяжения между жидкостями с ограниченной смешиваемостью.

При плавлении и дальнейшем (не высоком) нагревании расплава, коллоидная частица находится в метастабильном состоянии. Она может существовать в расплаве 10-ки часов, свободно перемещаясь в растворе. Для того чтобы разрушить такую частицу, необходимо передать ей избыточное количество энергии, которое пойдёт на преодоление сил атомных притяжений, выхода атомов кремния из кристаллической решетки и дальнейшего перехода коллоидной частицы в истинный раствор. Для того, чтобы передать такую энергию расплаву, необходимо перегреть его на 300 – 500°С выше температуры ликвидуса.

Автором теории было проведено много исследований нацеленных на выявление размеров подобных частиц находящихся в расплаве. Результаты экспериментов свидетельствуют о существовании в жидких силуминах дисперсных частиц, размеры которых либо лежат между 1 и 4 нм, либо составляют несколько десятков нанометров. Это даёт возможность разделить существующие в расплаве коллоидные частицы на 2 группы – это группа мелких частиц и группа крупных частиц. При нагреве расплава мелкие частицы, уменьшают свой размер до 0,94 нм, а большие частицы необратимо диспергируют на более мелкие и уменьшают в целом свой размер.

Таким образом, после экспериментов проведённых на эвтектических силуминах, представления о метастабильной микрогетерогенности эвтектических расплавов и о возможности ее модифицирования в результате термической обработки жидкого металла, перешли из разряда гипотез в разряд экспериментально подтвержденных фактов.

Модель расплавов, разработанная профессором Попелем, является действующей, и может применяться для объяснения процессов протекающих при плавлении и кристаллизации сплавов. Она находит реальные

экспериментальные подтверждения в ходе исследований. Так, например Попелем теоретически, на основании данных энтальпии смещения сплава Sn-Pb, были получены размеры радиуса коллоида в пределах 110-3 нм. А при изучении малоуглового рассеяния нейтронов (SANS) обнаружили наличие в расплавах частиц размером от 1 до 80 нм.

По мнению Г.Ф. Баландина [40] в расплаве также существуют примеси, которые могут оказывать влияние на процесс кристаллизации: растворимые и нерастворимые (механические). Эффект действия малых количеств растворимых примесей определяется наложением их влияния на поверхностное натяжение и энергию активации. При этом поверхностно активными примесями можно сократить интервал метастабильности вещества, т.е. повысить скорость самопроизвольного зарождения центров кристаллизации в области малых переохлаждений. Одновременно, вследствие повышения энергии активации из-за адсорбции примеси на гранях кристаллов можно уменьшить их скорость роста.

Частицы нерастворимых примесей могут оказывать так называемое контактное действие на процесс зарождения центров кристаллизации, так как зародыши будут возникать не в объеме переохлажденного расплава, а на готовой поверхности раздела фаз, т.е. на поверхности частиц примеси. Гетерогенное зарождение вызывают примеси, обладающие структурным сходством с кристаллизующимся веществом и имеющие параметры кристаллической решетки, близкие к параметрам решетки этого вещества. Автор приводит исследования В.И. Данилова, которые показали, что контактное действие нерастворимых примесей на процесс зарождения центров кристаллизации наблюдается и в том случае, когда нерастворимые примеси не обладают структурным сходством с данным веществом [40].

Такие примеси получили название активных или активированных. Контактное действие активных примесей удастся объяснить, предположив, что между частицами примесей и твердой фазой закристаллизовавшегося вещества возникает молекулярный контакт и, следовательно, образуется

пограничный слой, который будет обладать определенным для каждого сорта примеси структурным сходством с кристаллами данного вещества. Если температура плавления такого слоя выше температуры плавления кристаллов, то после их расплавления частицы примеси сохраняют переходный слой, т.е. станут активными.

Таким образом, структура реального расплава включает следующие составляющие:

- активированные нерастворимые частицы (примеси);
- дисперсные (коллоидные) недорастворившиеся частицы;
- большие и гигантские кластеры разных составов и размеров;
- малые и средние кластеры;
- разупорядоченная зона;
- дезактивированные примесные частицы.

В работе [41] вводится понятие «иерархия структур жидкого состояния» и на основании седиментационных исследований в жидких сплавах выделяется пять основных иерархических уровней конгломератов кластеров: от отдельных кластеров (1-10 нм) до каплеподобных макроконгломератов (10-1000 мкм).

2 СУЩЕСТВУЮЩИЕ СПОСОБЫ ФИЗИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАСПЛАВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МОДИФИЦИРУЮЩЕГО ЭФФЕКТА

В связи со структурными особенностями литых сплавов, такими как наличие грубых и хрупких включений кремния и интерметаллических фаз, прочностные характеристики силуминов невысокие, особенно низка пластичность. Силумины с мелкозернистым кристаллическим строением обладают более высоким уровнем механических и литейных свойств. Поэтому измельчение выделений α -твердого раствора и кремния является основной задачей в направлении улучшения свойств алюминиево-кремниевых сплавов. Для улучшения структуры и механических свойств литейных промышленных алюминиевых сплавов регулируют режимы плавки и литья, условия кристаллизации отливок. Однако наиболее эффективным фактором, определяющим благоприятное структурообразование силуминов, является модифицирование.

В последнее время повышенное внимание уделяется исследованию различных способов воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл, позволяющих получить модифицированную структуру без введения специальных добавок – модификаторов. Одним из наиболее эффективных способов повышения качества литого металла, при одновременном снижении материальных и энергетических затрат на его изготовление, является разработка и освоение новых методов литья, основанных на использовании физических воздействий на металлический расплав на всех этапах формирования структуры и свойств литых изделий.

Физические воздействия существенным образом влияют не только на процессы тепломассопереноса, но и на гидродинамические процессы конвективного и теплокапиллярного перемещения фаз. Наиболее важными результатами таких воздействий являются: воздействие на устойчивость границы кристаллизации и формирование кристаллической структуры литья; перемещение центров кристаллизации и плавающих кристаллов из зоны

двухфазного состояния в объеме затвердевающего расплава; всплывание неметаллических включений и газов; смывание ликвационных элементов с границы фаз и перераспределение их в объеме отливки; управление характером конвективного движения расплава в затвердевающем замкнутом объеме отливки; интенсификация передачи теплоты от перегретого расплава к затвердевающей корке и не затвердевшей части отливки; гомогенизация химического состава металлического расплава.

В зависимости от вида энергоносителя все существующие физические способы воздействия на расплав можно разделить на следующие группы: механические; тепловые; барометрические; электромагнитные; высокоэнергетические (корпускулярные).

2.1 Механические способы воздействия на расплав

Механические способы воздействия на расплав основываются на перемещении микрообъемов расплава друг относительно друга (перемешивание, фильтрация, продувка газами, обработка вибрацией и ультразвуком) для получения однородной мелкозернистой структуры по всему объему.

Одним из самых распространенных является следующий метод перемешивания, когда в процессе приготовления плавки расплав перемешивается вручную или механически крановой мешалкой. Схема метода показана на рисунке 2.1.

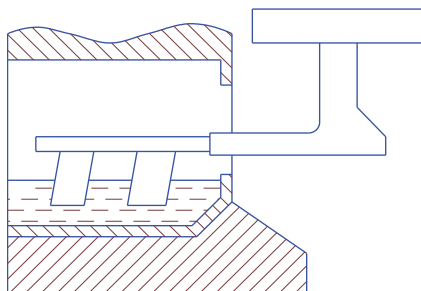


Рисунок 2.1 – Схема перемешивания расплава крановой мешалкой

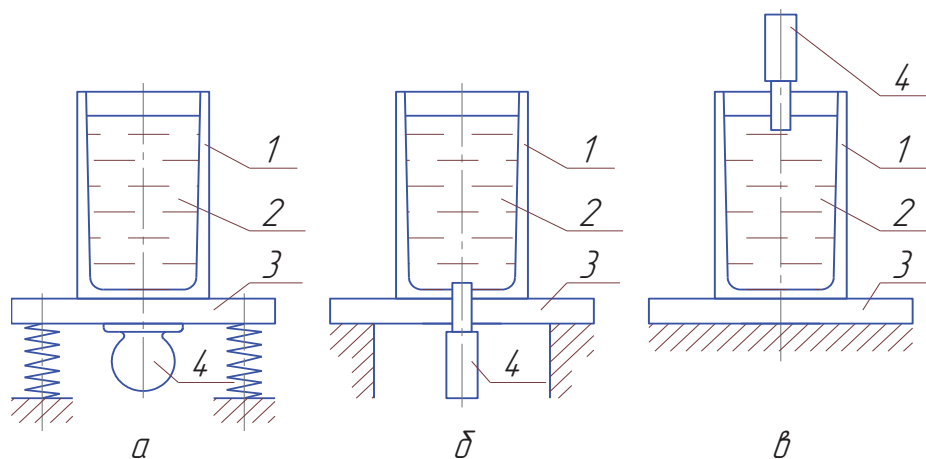
Такой метод перемешивания применяется, в частности, при плавке алюминиевых сплавов в газовых отражательных печах. Для осуществления перемешивания расплава во время плавки открывают окна печи, в пространство печи вводят насадку-мешалку, установленную на мультдозавалочном кране, и перемещением насадки перемешивают расплав. Перемешивание производится в течение 5 - 10 минут до 5 раз в плавку.

Основное преимущество данного метода – простота реализации. В результате такого перемешивания измельчается структура сплава, повышаются механические свойства и жидкотекучесть.

Однако при этом существует множество недостатков. Многократное перемешивание жидкого сплава плавильным инструментом приводит к сильному увеличению газонасыщенности расплава за счет газов (особенно паров воды), адсорбированных на поверхности инструмента и вносимых с ним в жидкий металл. Кроме того, погружаемый в ванну инструмент на какое-то время разрушает окисную пленку, защищающую сплав от проникновения в него газов. Газы атмосферы получают возможность более свободно проникать в расплав, усиленно в него диффундируют, растворяясь или образуя неметаллические включения. Также механические мешалки не обеспечивают необходимой однородности химического состава сплава по всему объему в связи с несовершенством создаваемых ими гидродинамических потоков, и, кроме того, при перемешивании металл засоряется материалом мешалок.

Во время перемешивания через открытые окна теряется значительное количество тепла излучением печи из-за поступающего холодного воздуха, а также происходит разрушение подины крановыми мешалками. А также в расплав замешиваются окисные пленки, которые ухудшают качество слитков.

Широко применяются вибрационные воздействия, например, вибрация формы с использованием низких частот (рисунок 2.2) (30...150 Гц) [42, 43 – 47] или ультразвуковых колебаний (рисунок 2.3) [43, 48 – 50].



1 – форма (изложница); 2 – расплав; 3 – стол; 4 – вибратор.

а – вибростол; б – введение вибрации инструментом через дно изложницы;

в – то же сверху

Рисунок 2.2 –Схема вибрирования расплава в форме

Преимущества вибрация формы с использованием низких частот:

1. Вибрация расплава не только разрушает скелеты растущих кристаллов и этим самым способствует образованию новых центров кристаллизации, но и создает условия для слияния первоначально изолированных зон жидкого металла с основной массой. В результате исключается возможность образования усадочных микрораковин и рыхлот на 11 - 14 %.

2. Вибрация способствует проникновению расплавленного металла в междендритное пространство, влияя эффективнее металлостатического давления.

3. Действие вибрации способствует ускоренному выделению газов и всплыванию неметаллических включений из жидкого металла.

4. Применение вибрации дает возможность устранить транскристаллизацию и значительно измельчить зерно в слитках, уменьшить

глубину ликвационной зоны и улучшить пластические свойства литого металла.

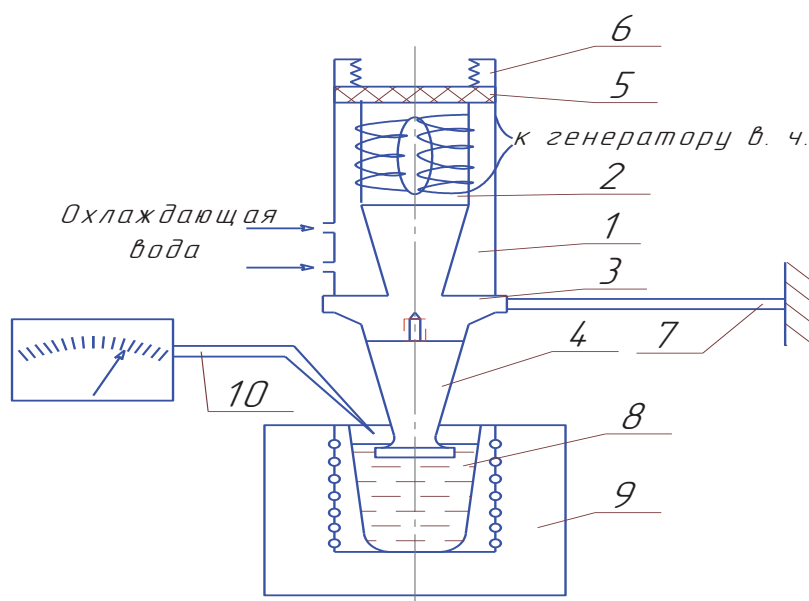
5. Вибрация способствует повышению химической и структурной однородности металла и качества отливки.

6. Повышение качества отливок в свою очередь способствует снижению их себестоимости до 14 %.

Недостатки:

1. Для того чтобы вибрация принесла ожидаемые результаты, необходимо проводить толчки в определенном направлении, перпендикулярном к главным осям кристаллов, а не вдоль их.

2. Применение вибрации целесообразно для сплавов затвердевающих в интервале температур. Однако нет смысла расходовать излишнюю энергию для эвтектических сплавов и чистых металлов.



1 – кожух; 2 – магнитострикционный преобразователь с обмоткой;
3 – концентратор; 4 – волновод с резьбовым креплением; 5 – резиновый амортизатор; 6 – сильфон; 7 – крепление узла колебаний, опора;
8 – тигель с расплавом; 9 – печь электросопротивления; 10 – термопара

Рисунок 2.3 – Схема введения упругих колебаний в расплав

Метод литья с применением ультразвуковой вибрацией способствует уменьшению газовой и усадочной пористости, устранению горячих трещин в отливках и вызывает существенное измельчение зерна и значительное уменьшение химической неоднородности в литых металлах и сплавах.

Недостатками такого способа являются:

1. Сложность конструкции и сравнительно низкая эффективность воздействия ультразвуковых колебаний из-за ограниченной мощности ультразвукового генератора.

2. Возможность насыщения расплава материалом вибратора, что приводит к изменению химического состава сплава.

Кроме того используются способы перемешивания расплава в форме, среди которых наиболее изученным является перемешивание сплавов в центробежной форме путем применения изменяемой скорости вращения (рисунок 2.4) [51, 52].

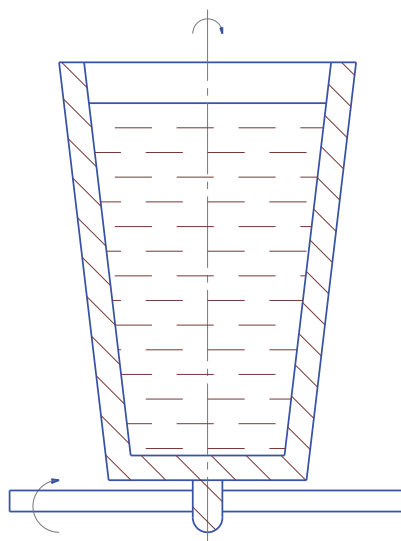


Рисунок 2.4 – Схема перемешивания расплава вращением изложницы

За последние годы разработаны и самые различные схемы фильтрации расплава металла с использованием керамических фильтров, стеклоткани с

малым размером ячейки, совмещенные методы фильтрации и продувки газами (рисунок 2.5), ультразвуковой обработки и т.д. [53, 54].

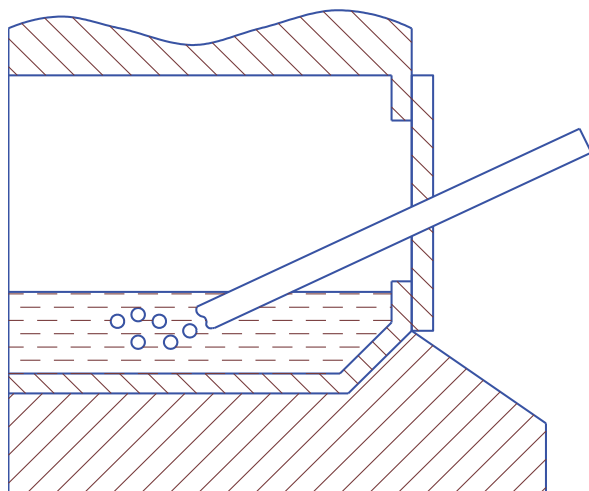


Рисунок 2.5 – Схема перемешивания расплава продувкой газом

2.2 Тепловые способы воздействия на расплав

Работы М.Х. Шоршорова [55], Б.А. Баумана, Г.В. Тягунова [56], Г.С. Ершова, В.З. Кисунько, А.Г. Спасского, Г.Г. Крушенко, Ри Хосена, И.А. Новохатского, Ю.Н. Тарана, В.И. Никитина, И.Ф. Селянина и др. показали, что подготовка расплава к кристаллизации за счет уточнения режимов его термовременной обработки (ТВО) влияет на процесс затвердевания и способствует улучшению структуры и свойств литого металла [57 – 63]. Создан целый ряд эффективных технологий ТВО, представляющих собой перегрев расплава выше температуры ликвидус до или выше критических температур, в результате которого происходят структурные перестройки элементов расплава, и определенную выдержку при этих температурах [59, 61].

Данный способ обработки способствует устранению отрицательного наследственного влияния шихтовых материалов и тем самым улучшает

структуру и повышает уровень механических свойств литых алюминиевых сплавов, не требуя при этом применения дополнительного оборудования.

Для гарантированного измельчения структуры по всему объему расплава перегрев применяется при оптимальном повышении его температуры, так как произвольное увеличение температуры жидкого металла и произвольная выдержка при этой температуре могут привести к значительному газонасыщению расплава, снижению служебных характеристик вследствие перемодифицирования структуры, изменению химического состава сплава из-за угара легирующих и модифицирующих элементов [59]. Так, оптимальные температуры нагрева для расплавов силуминов, по мнению различных исследователей, составляют от 800°С до 1150°С в зависимости от марки сплава и состава шихты.

Высокотемпературный тип структуры ближнего порядка жидкой фазы можно зафиксировать путем быстрого охлаждения расплава перед заливкой – термоскоростной обработкой (ТСО), так как скорость структурных превращений в жидкой фазе достаточно низкая, несмотря на сравнительно большие скорости процессов диффузии. Увеличение скорости охлаждения расплава является также значимым фактором, приводящим к измельчению микроструктуры и повышению механических свойств [64].

2.3 Барометрические способы воздействия на расплав

Барометрические способы воздействия основаны на создании внешнего давления, отличного от атмосферного (от глубокого вакуума до кристаллизации под сверхвысоким давлением).

Широко используются способы литья под регулируемым перепадом газового давления. Объединяющим технологическим признаком этой группы способов литья является заливка формы выдавливанием жидкого металла снизу вверх из тигля установки через металлопровод под действием,

создаваемого в них перепада газового давления. К литью под регулируемым перепадом газового давления относятся три способа литья [65]:

1. При наличии в полости формы давления газа, соответствующего атмосферному, заливка осуществляется благодаря избыточному давлению газа над зеркалом расплава в тигле установки. Этот способ получил название литья под низким давлением (ЛНД). Сущность метода заключается в том, что на жидкий металл, находящийся в герметичном тигле, подается избыточное давление (1,0 атм), под воздействием которого металл по металлопроводу поднимается вверх и заполняет полость литейной формы. В отличие от большинства известных способов литья, основанных на заливке дозы жидкого металла непосредственно в форму или в промежуточное заливочное устройство в условиях ЛНД жидкий металл, находящийся в тигле, металлопроводе и полости литейной формы, в течение всего процесса формирования отливки составляет единую гидравлическую, тепловую, силовую и концентрационную замкнутую систему.
2. Заполнение формы расплавом происходит вопреки препятствию находящегося в ее полости сжатого газа, давление которого превышает атмосферное. Такой способ литья называется литье с противодавлением (ЛПД). Основой этого способа является ЛНД. После смыкания полуформ и герметизации формы в камерах заливочного устройства и формы синхронно увеличивают давление газа до рабочего, при этом движение расплава отсутствует. Необходимый для заполнения полости формы жидким металлом перепад давлений образуется при уменьшении на эту величину давления в камере с формой или соответствующего повышения давления газа над зеркалом расплава в тигле установки. В итоге при ЛПД (как и при ЛНД) заполнение форм расплавом осуществляется в результате создания соответствующего перепада давлений.

3. Способ литья вакуумным всасыванием (ЛВВ) основан на прямо противоположном эффекте – устранении противодавления газа в полости формы путем ее вакуумирования. При ЛВВ получают полые заготовки всасыванием расплава в изложницу и последующим сливом не затвердевшего остатка обратно в тигель. Способом ЛВВ могут быть получены также сплошные отливки и слитки в водоохлаждаемых кристаллизаторах.

Кроме того, существуют и другие способы, например, литье под всесторонним газовым давлением (ЛВГД), называемое также автоклавное. Сущность процесса ЛВГД состоит в том, что расплав выплавляют и заливают в литейную форму под атмосферным давлением, после чего форму помещают в автоклав, в котором создается избыточное давление сжатого воздуха (или газа) 0,4 – 0,6 МПа. Таким образом, при ЛВГД под избыточным давлением протекает заключительная стадия литейного цикла – затвердевание отливки [66].

2.4 Высокоэнергетические способы воздействия на расплав

В последние годы активно развиваются новые методы высокоэнергетической (корпускулярной) обработки, например, лазером, плазмой или микрочастицами с высокой энергией. За счет воздействия на более глубокие уровни структуры сплавов они позволяют получать принципиально новые свойства.

Например, известен способ воздействия лазерным излучением на расплавы, содержащие алюминий [67]. Суть способа заключается в облучении расплава непрерывным (лазер – Камета-2, частота $\approx 10^{14}$ Гц) или импульсным с синусоидальным заполнением (лазер Квант-15, частота $\approx 10^{15}$ Гц) электромагнитным излучением. Проводится обработка поверхности расплавленного металла сфокусированным лучом путем перемещения его по

поверхности, либо расфокусированным лучом, охватывающим всю поверхность.

Отмечено, что после облучения изменяется фазовый состав и структура алюминиевых сплавов, а также увеличение твердости облученных образцов по сравнению с необлученными. Физику такого воздействия авторы объясняют повышением температуры в локальной области, где действует излучение. Это приводит к изменению структуры расплава и образованию новых химических соединений: оксидов, нитридов, гидридов. Разный коэффициент поглощения излучения для различных элементов расплава приводит к разной величине поглощенной энергии, что может привести к распаду одних группировок элементов и возникновению новых.

Стоит отметить небольшую эффективность такого воздействия из-за малой величины объема облучаемого расплава, так как сфокусированный и расфокусированный лучи имеют малые диаметры, а воздействие осуществляется через поверхность расплавленного металла.

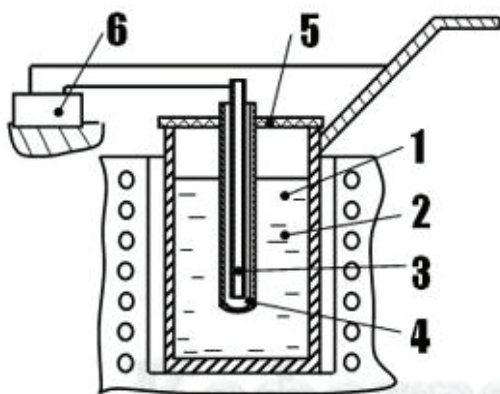
Известна электрогидроимпульсная обработка (ЭГИО) расплава, осуществляемая повторяющимися импульсами давления, которые возникают при высоковольтном пробое жидкости в электроразрядном генераторе упругих колебаний (ЭРГУК). Импульсы давления в расплав передаются через волновод ЭРГУК. Характерными особенностями ЭГИО являются высокая мгновенная мощность в импульсе и широкий спектр частот единичного импульса (от 0,1 до 100000 Гц) [68].

Электрическая энергия в течение (1 – 100) мкс выделяется в канале разряда – области между положительным электродом и внутренним торцом волновода ЭРГУК. В результате преобразования электрической энергии в тепловую вещество канала разряда превращается в низкотемпературную плазму ($4 \cdot 10^4$ К). Давление в канале разряда достигает 10^3 МПа. Канал разряда расширяется со скоростью, насчитывающей десятки и сотни метров в секунду, что вызывает появление сильной волны сжатия. Частота следования импульсов ограничена временем существования парогазовой полости, однако

может быть существенно увеличена в ЭРГУК многоэлектродного типа. На формирование канала электрического разряда в разрядном промежутке ЭРГУК существенное влияние оказывает та среда, в которой производится высоковольтный разряд. Обычно, это техническая вода: диапазон проводимостей $(1-100) \cdot 10^{-2} \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$. При высоковольтном электрическом разряде в воде реализуются четыре вида давлений. Это давление в канале разряда, давление на фронте волны сжатия, давление от торможения гидротока и гидростатическое.

В конечном итоге воздействие на технологическую среду сводится к созданию в нем мощного нестационарного акустического поля. Акустическое поле вызывает кавитацию. При этом растворенный в расплаве газ выделяется в образующиеся несплошности, происходит коагуляция газовых включений, их удаление, рафинирование расплава от вредных примесей, интенсификация гидро- и массообменных процессов в объеме расплава и его гомогенизация [68].

К высокоэнергетическому воздействию на расплав можно также отнести активно развивающуюся в последние годы технологию обработки наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) жидкой фазы цветных металлов (рисунок 2.6).



1 – печь сопротивления; 2 – расплав; 3 – излучатель; 4 – кварцевая трубка;
5 – асбестовая крышка; 6 – генератор НЭМИ

Рисунок 2.6 – Схема установки для обработки расплава НЭМИ

НЭМИ образуют локальные поля высокой мощности и напряженности, тем самым создают условия для управления структурой и свойствами металлических расплавов [69]. Особенностью такого воздействия является создание однополярного импульса тока в качестве возбуждающего токового импульса. Длительность такого импульса составляет порядка 0,5-1 нс, а его мощность более 1 МВт, при частоте повторения 1000 Гц.

2.5 Электромагнитные способы воздействия на расплав

Одним из перспективных способов внешнего воздействия на расплав является наложение на жидкий и кристаллизующийся металл электрического и магнитного полей, позволяющих эффективно управлять движением расплава, процессами тепломассопереноса, структурой, свойствами и формой отливок [70 – 72].

2.5.1 Обработка расплава электрическим током

Электрический ток при воздействии на расплав металла оказывает кроме эффективного влияния на его движение, процессы тепломассопереноса, управления структурой и свойствами литых изделий, еще и одновременный прогрев отливки, что стабилизирует температурное поле по времени и в объеме, так как является внутренним источником энергии. Это приводит к снижению возможности образования дефектов в отливке.

В работах [73, 74] проведены исследования по влиянию электрического тока на структуру и свойства алюминиевых сплавов. Было установлено, что при пропускании тока через расплав возникает магнитное поле, которое создает силы, снижающие скорость движения макрообъемов расплава на границе раздела фаз. В результате это приводит к измельчению структуры металла отливки. Это объясняется тем, что затрудняется рост зерен из-за невозможности слияния более тугоплавких примесных и легирующих

элементов, являющихся центрами кристаллизации. Кроме того, повышается скорость растворения металлических примесей и других элементов, которые также являются центрами кристаллизации.

Другим положительным эффектом при пропускании тока через расплав является его дегазация. Д.Л. Ловцов в работе [75] провел ряд исследований в этом направлении. Явление дегазации жидкого металла электрическим током служит подтверждением ионизации водорода в расплаве. При этом наблюдается неравномерное распределение водорода – у катода газонасыщение возрастает, а у анода падает. После отключения тока газосодержание выравнивается по всему объему расплава.

В работе [76] изучали влияние электрического тока на процесс кристаллизации сплава при литье в песчаные формы. Для непосредственного воздействия тока на расплав металла в момент его заливки в форму использовали последовательно расположенные контакты, примыкающие к отливке. Таким образом, достигалось действие тока на металл на всех этапах его кристаллизации. Воздействие тока на отливку, находящуюся в твердом состоянии, по завершении процесса кристаллизации и охлаждения ее до температуры $(0,2...0,5)T_{пл}$, приводит к дополнительному снижению механических напряжений, что равноценно операции отжига. Выбор плотности тока, пропускаемого по формируемой отливке, определяется фазовым состоянием ее материала. Максимальная плотность тока, пропускаемого в процессе кристаллизации материала, лимитируется отсутствием возможности перехода твердой фазы в жидкую, а минимальная – условием зародышеобразования. Предел прочности образцов, полученных под воздействием электрического тока, повысился в среднем на 10%.

Таким образом, воздействие электрического тока существенно сокращает междендритное пространство и повышает дисперсность структуры, снижает содержание газов и неметаллических включений, улучшает условия растворения модификатора, что оказывает положительное влияние на механические свойства литого металла. Однако, при

использовании установки, вырабатывающей электрический ток, возникают трудности по обеспечению равномерной обработки расплава, существует вероятность получения не полностью или неравномерно модифицированной структуры, особенно при получении массивных отливок сложной конфигурации.

2.5.2 Обработка расплава электромагнитными полями

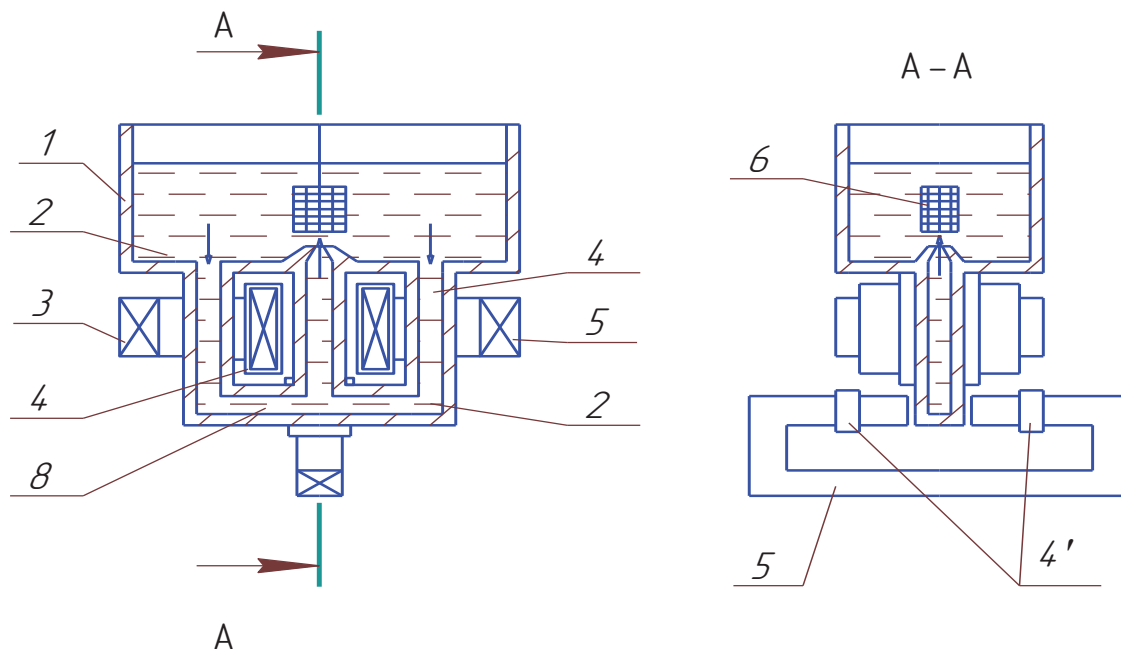
Воздействие магнитного поля на металлические расплавы при плавке, заливке и кристаллизации изучали Л.А. Верте, В.А. Ефимов, И.Л. Матюшков, И.Л. Повх, Б.К. Чекин, В.П. Полищук, М.Р. Цин, В.И. Дубоделов, В.И. Добаткин, З.Н. Гецелев, И.А. Чернышов, Г.Е. Левшин, Р.К. Мысик, В.Д. Александров, В.И. Петренко и др. [77 – 92].

В работе [77] отмечается, что электромагнитное воздействие создает дополнительные конвективные потоки, которые обламывают ветви растущих дендритов и переносят их в расплав. При этом характер кристаллизации изменяется от последовательной к объемной, что приводит к увеличению количества центров кристаллизации и изменению характера макроструктуры.

Авторы работы [77] отмечают, что при кристаллизации алюминиевых сплавов с магнием и медью в магнитном поле с индукцией 0,5 – 1,0 Тл измельчается как макро-, так и микроструктура сплавов, а предел прочности возрастает на 30%.

На сегодняшний день разработан целый комплекс магнитогидродинамических устройств (МГД-устройства) (рисунок 2.7), создающих в металле отливки электромагнитные силы, которые позволяют эффективно управлять движением расплава, процессами тепломассопереноса, структурой, свойствами и формой отливок [77, 79 – 83]. В качестве примера можно привести электромагнитные перемешиватели и электромагнитные кристаллизаторы при непрерывном литье слитков, МГД-заливочные установки, которые широко используются при

специальных видах литья. При непрерывном литье алюминиевых сплавов применяют МГД-заливочные установки на базе электромагнитных желобов с газовыми или электрическими камерными печами.



1 – ванна; 2 – каналы; 3 – трансформаторы; 4 и 4' – обмотки возбуждения;
5 – электромагнит; 6 – кассета

Рисунок 2.7 – Магнитодинамическая установка

Для ванн легких сплавов, по мнению Л.А. Верте, более перспективными являются не серийные статорные электромагнитные перемешиватели, а электромагнитные перемешиватели погружного типа, состоящие из магнитного сердечника, обмотки и защитной футеровки [71]. Перемешиватель погружают в циркуляционную камеру с расплавом. При подаче электропитания в зоне действия электромагнита создаются пульсации металла, которые приводят к активному перемешиванию всего объема расплава в циркуляционной камере.

Общим недостатком погружных электромагнитных перемешивателей является необходимость решения проблемы выбора огнеупоров, способных

защищать погружаемую в расплав электрическую часть установки от воздействия высокотемпературной и агрессивной среды. Кроме того, недостатком отечественного варианта этого типа устройств является неизбежное нарушение поверхностной окисной пленки, а зарубежного – возможность лишь порционной обработки расплава.

Специально для литейного производства были созданы МГД-лотки и МГД-насосы, принцип работы которых основан на взаимодействии тока, индуцированного в кольцевом канале с жидким металлом и внешнего магнитного поля [81]. Перемешивание осуществляется бегущим магнитным полем. Применение этого способа позволило увеличить более чем в два раза скорость растворения легирующих добавок (Cu, Si, и Mg), значительно сократить время достижения минимального температурного и концентрированного градиента в объеме ванны, повысить производительность печи до 30%. Кроме того, перелив металла с помощью того же МГД – лотка, как показал ряд исследований, дает возможность почти в три раза уменьшить содержание окиси алюминия и заметно, содержание водорода в готовых полуфабрикатах [71, 93].

Широкое использование нашел способ непрерывного литья алюминиевых сплавов в электромагнитные кристаллизаторы (ЭМК) (рисунок 2.8), который заменил способ литья в кристаллизатор скольжения. Жидкий металл в пульсирующем электромагнитном поле испытывает силовое воздействие, возникающее вследствие взаимодействия вихревых токов, наведенных в металле, с магнитным полем индуктора. В результате жидкий металл, находящийся под некоторым гидростатическим давлением, удерживается от растекания и отжимается в радиальном направлении от индуктора. Образующийся при этом столб жидкого металла повторяет форму индуктора и приобретает размеры, зависящие от интенсивности магнитного поля [90].

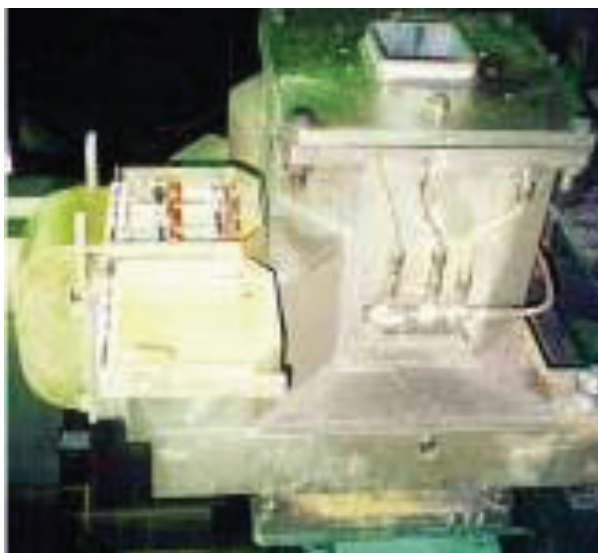


Рисунок 2.8 – Внешний вид электромагнитного кристаллизатора конструкции ВНИИМЕТМАШ - ЗАО "ЭМТ"

Литье в ЭМК принципиально отличается от других разновидностей литья слитков отсутствием контакта жидкого металла со стенками формы. Это создает возможность устранения ликвационных наплывов и неслитин, что приводит к значительному улучшению качества поверхности слитка. ЭМК позволяет получать изделия различной и достаточно сложной формы: круглые сплошные и полые слитки, плоские слитки, практически любых размеров [94, 95].

Разрабатываются способы обработки расплавов магнитным полем и при производстве фасонных отливок. Например, известно устройство для обработки расплава при заливке в литейную форму. Принцип работы такого устройства следующий. Расплав заливается в воронку и по мере его протекания по керамическому желобу, расположенному внутри конусной индуктивной катушки происходит обработка струи расплава магнитным полем, затем расплав попадает в литейную форму. Угол наклона катушки позволяет регулировать время протекания расплава по желобу и соответственно, интенсивность обработки магнитным полем. В процессе обработки расплава величина индукции магнитного поля B по оси катушки может меняться в интервале от 0,1 до 0,9 Тл [96].

3 МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА РАСПЛАВОВ

3.1 Параметры магнитно-импульсной обработки расплава

Эксплуатационные характеристики отливок определяются физико-механическими свойствами сплава, которые формируются в предкристаллизационный и кристаллизационный периоды. С этих позиций представляется возможным управление процессом формирования отливок с определенным комплексом свойств путем воздействия на расплав импульсного магнитного поля (ИМП) высокой напряженности. Первые же поисковые эксперименты показали высокую эффективность такого магнитно-импульсного воздействия на расплав.

Схема воздействия ИМП на расплав представлена на рисунке 3.1.

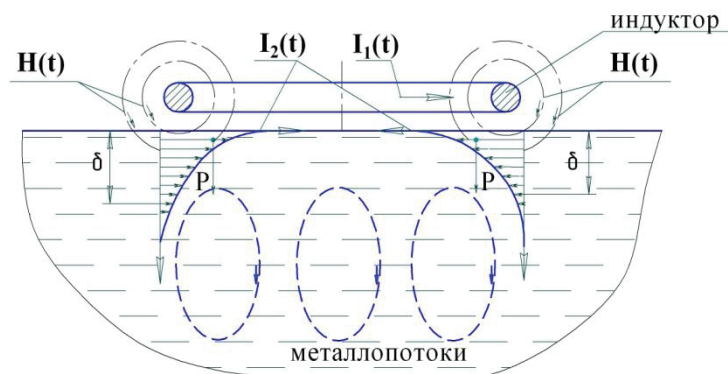


Рисунок 3.1 – Схема воздействия ИМП на расплав

Под действием ИМП в расплаве наводятся вихревые токи, являющиеся дополнительными внутренними источниками тепла, а также возникают электромеханические усилия, порождающие волновые эффекты и металлопоток. Распространение ударных волн, благоприятно воздействует на процесс уплотнения металла, на его дегазацию, формирование мелкозернистой структуры. Возникающие металлопоток интенсифицируют

и изменяют условия кристаллизации. Направленность металлопотоков в первую очередь зависит от формы и расположения индукторных систем.

Исходя из физики процесса магнитно-импульсной обработки можно выделить три основных фактора такого комплексного теплосилового воздействия на расплав металла:

- дополнительный разогрев расплава под действием внутренних источников энергии, возникающих из-за вихревых токов;
- распространение в расплаве ударных волн, возникающих в результате действия давления ИМП;
- развитие интенсивных металлопотоков вследствие неравномерного распределения давления ИМП или конструкции и расположения индуктора.

Применительно для магнитно-импульсной обработке расплавов электромагнитные импульсы тока представляют собой синусоидальные затухающие сигналы с длительностью (t) $50 \div 500$ мкс и амплитудой тока (I_{max}) $10 \dots 100$ кА. Такое магнитно-импульсное воздействие на расплав может быть многократным (n), с временным интервалом между импульсами $0,5 \div 1$ секунды и более (рисунок 3.2) и оказывать давление (P) $1 \dots 10$ МПа. Скин-слой для обрабатываемых расплавов может варьироваться, например, для литейных алюминиевых сплавов системы Al-Si составляет от 1 до 5 мм.

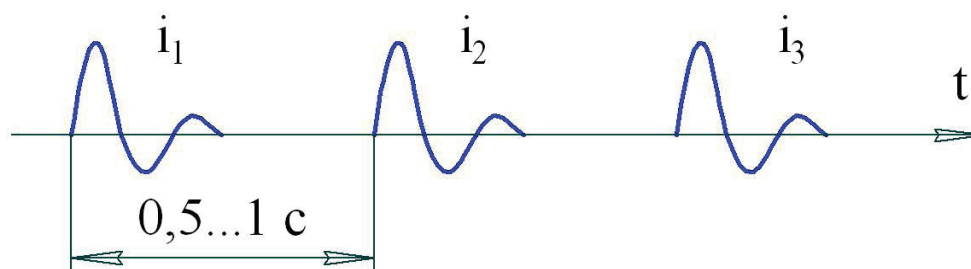


Рисунок 3.2 – Диаграмма импульсов разряда

На рисунке 3.3 показано распределение давления импульсного магнитного поля.

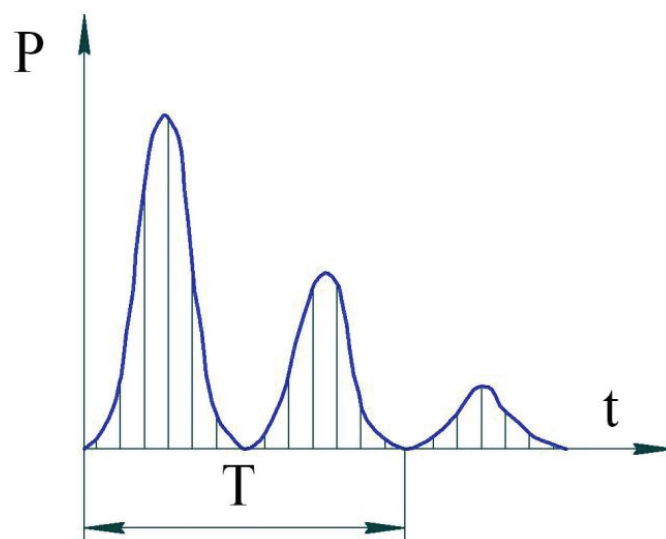
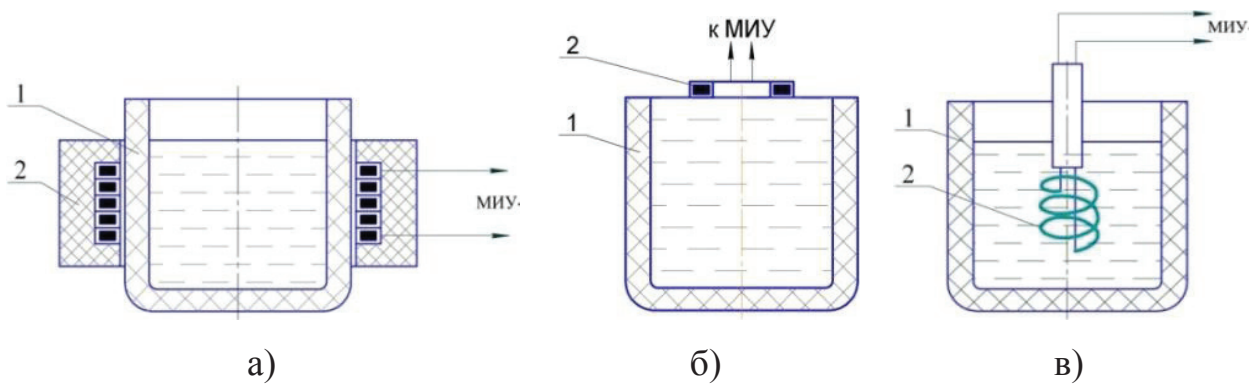


Рисунок 3.3 – Распределение давления импульсного магнитного поля

3.2 Основные технологические схемы магнитно-импульсной обработки расплава

Проведенная теоретическая оценка факторов воздействия импульсного магнитного поля на жидкий и кристаллизующийся металл позволила предложить для разработки ряд технологических схем. Принципиально возможны три технологические схемы магнитно-импульсной обработки:

- радиальное воздействие на расплав через стенки магнитопрозрачного тигля (рисунок 3.4а);
- осевое воздействие на поверхность расплав (рисунок 3.4б);
- воздействие на расплав с помощью погружного индуктора (рисунок 3.4в).



1 – индуктор; 2 – тигель; МИУ – магнитно-импульсная установка

Рисунок 3.4 – Основные технологические схемы магнитно-импульсной обработки

Для осуществления первой схемы применяются индукторы аналогичные индукторам для штамповки металлов магнитно-импульсным полем, но с дополнительной изоляцией витков асбестовой лентой для возможности их работы при высоких температурах. В этом случае тигель должен быть изготовлен из магнетопрозрачного материала.

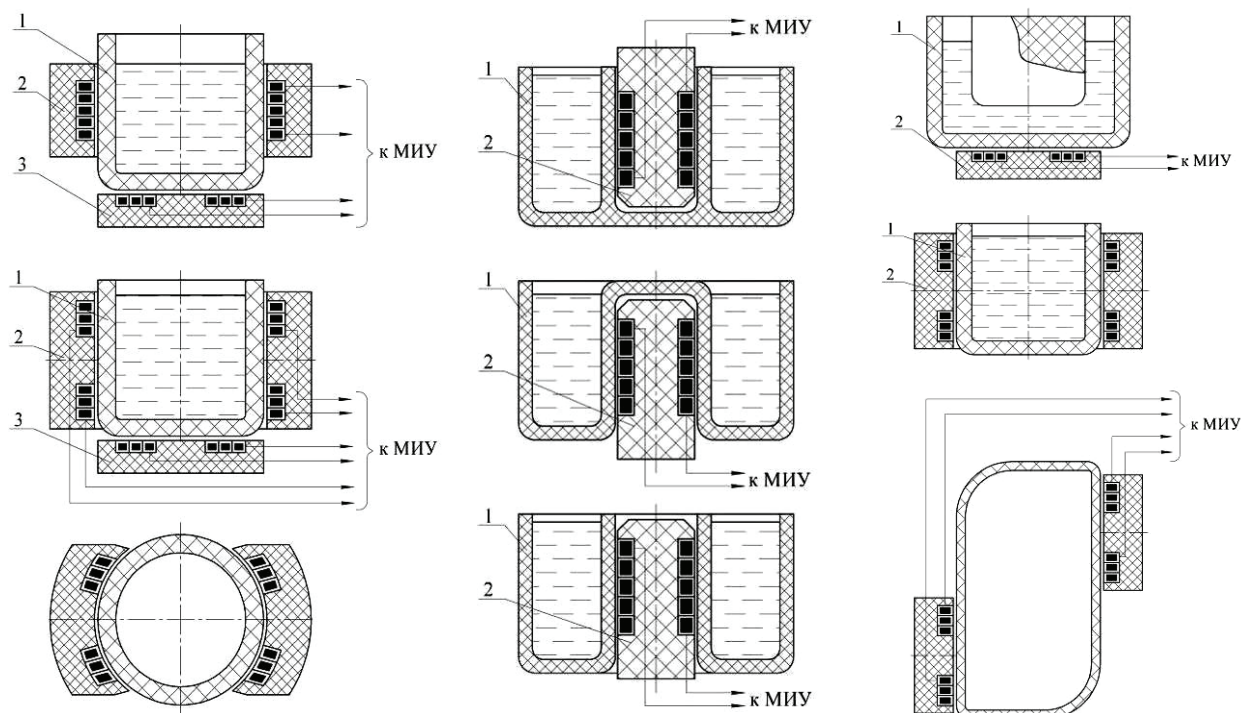
Главное преимущество этой схемы заключается в том, что к данному времени накоплен большой опыт в изготовлении таких индукторов и их изоляции. Недостатком схемы является то, что индукторы имеют ограниченные размеры, следовательно, имеется ограничение по объему обрабатываемого расплава.

Индуктора по второй схеме работают в более щадящих режимах, поэтому предъявляемые к ним требования менее жесткие. Помимо этого, их можно перемещать в процессе магнитно-импульсной обработке, что позволит обрабатывать большие объемы расплав.

Третья схема магнитно-импульсной обработки расплава имеет сходства со схемой обработки расплава вибрацией с ультразвуковой частотой. В этом случае к индуктору применяются следующие требования: он должен обладать достаточной огнеупорностью, и изготовлен из химически нейтрального материала по отношению к расплаву. Такая схема как и

предыдущая позволяет обрабатывать расплав по зонам, и путем перемещения индуктора охватывать большие его объемы. Однако возникает проблема выбора изоляции индукторов для данной схемы, так как помимо изоляции витков индуктора от расплава необходимо обеспечить изоляцию и от электрического пробоя.

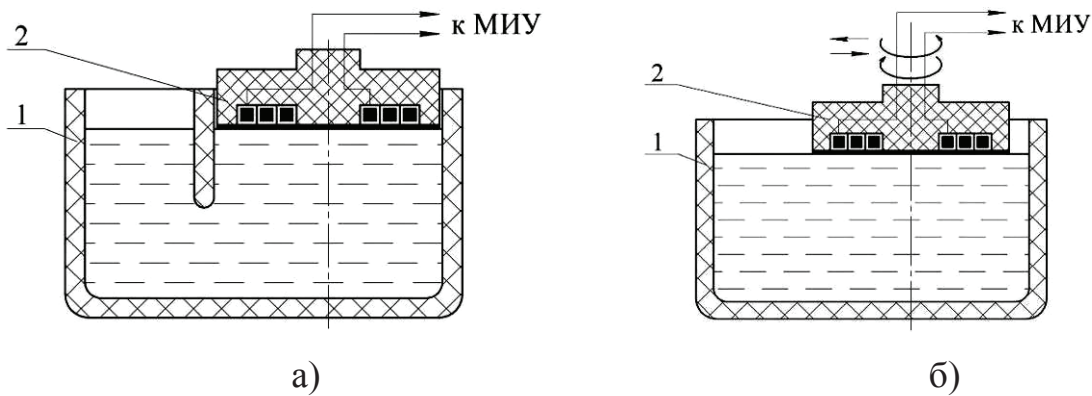
Сочетая плоские и цилиндрические индукторы, а также меняя их месторасположение и форму тигля, можно получить различные варианты схем магнитно-импульсной обработки расплава наружными индукторами (рисунок 3.5).



1 – тигель; 2 – индуктор «на обжим»; 3 – плоский индуктор

Рисунок 3.5 – Технологические схемы магнитно-импульсной обработки расплава с применением наружных индукторов и специальных тиглей

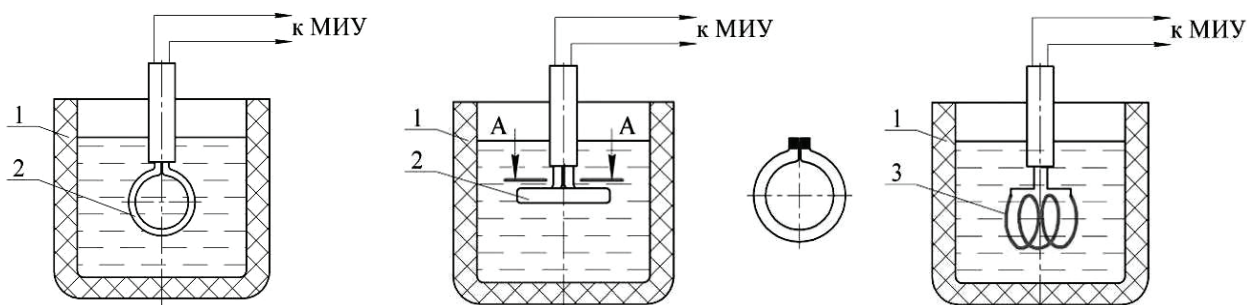
На рисунке 3.6 представлена технологическая схема осевого воздействия ИМП, на которой индуктор размещен непосредственно над поверхностью расплава металла. Он может быть неподвижным (рисунок 3.6а) или совершать поступательные и вращательные движения (рисунок 3.6б).



1 – тигель; 2 – плоский индуктор

Рисунок 3.6 – Технологические схемы магнитно-импульсной обработки с применением индукторов, размещенных непосредственно над поверхностью расплава металла

Погружные индукторы могут быть одно- и многовитковые (рисунок 3.7) в количестве одного или нескольких одновременно.



1 – тигель; 2 – одновитковый индуктор; 3 – многовитковый индуктор

Рисунок 3.7 – Технологические схемы магнитно-импульсной обработки металлического расплава погружными индукторами

Также возможны комбинированные схемы МИО с применением и наружных, и погружных индукторов. Различные варианты технологических схем могут быть получены изменением формы, размеров и месторасположения индукторных систем.

3.3 Силовой фактор магнитно-импульсной обработки расплава

Для исследования силового фактора МИО использовалось компьютерное моделирование. На данный момент единственным конечно-элементным комплексом позволяющим решать подобные сложные задачи является LS-DYNA. Это достигается за счет нового электромагнитного модуля, позволяющего моделировать подобные связанные процессы в комплексе, с учетом явлений электромагнетизма, тепла и механики [97].

При моделировании были рассмотрены опробованные на практике схемы МИО: радиальная и осевая. В качестве модели материала для описания расплава использовалась *MAT_NULL с уравнением состояния Ми-Грюнайзена (*EOS_GRUNEISEN). В качестве нагрузки используется токовая кривая, полученная экспериментальным путем с помощью пояса Роговского, которая назначена для определенных наборов сегментов индуктора. Таким образом при моделировании рассматривался только один импульс с разрядным током в индукторе, который соответствует значению энергии равному 1,5 кДж (рисунок 3.8).

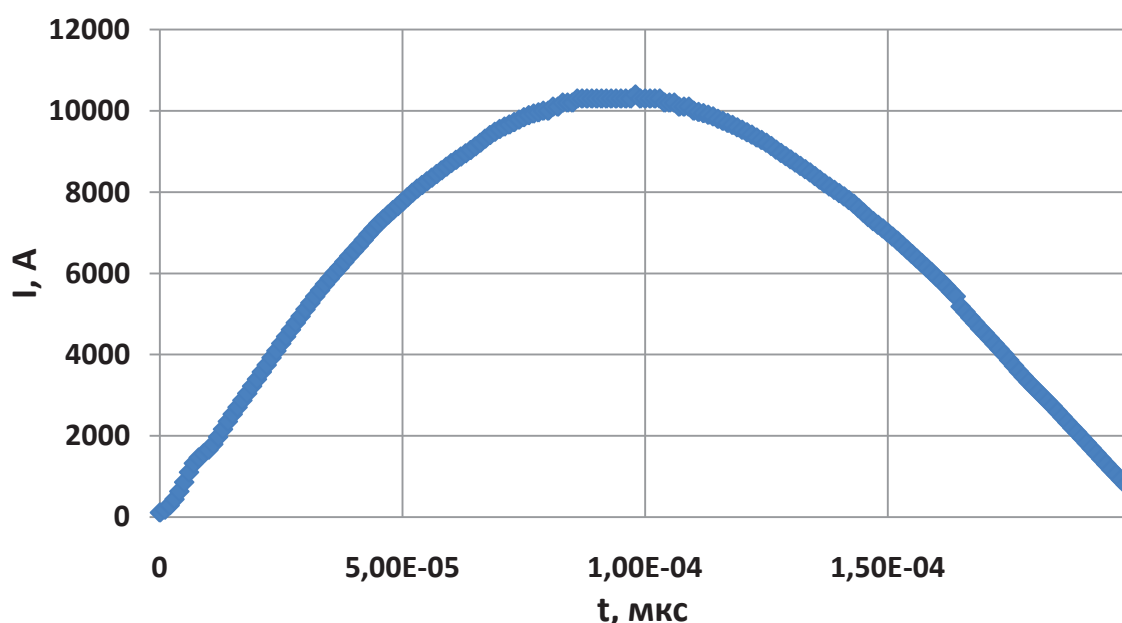


Рисунок 3.8 – Токовая кривая используемая при компьютерном моделировании

Одним из основных проявления магнитно-импульсного воздействия является давление импульсных магнитных полей на расплав (рисунки 3.9 и 3.10).

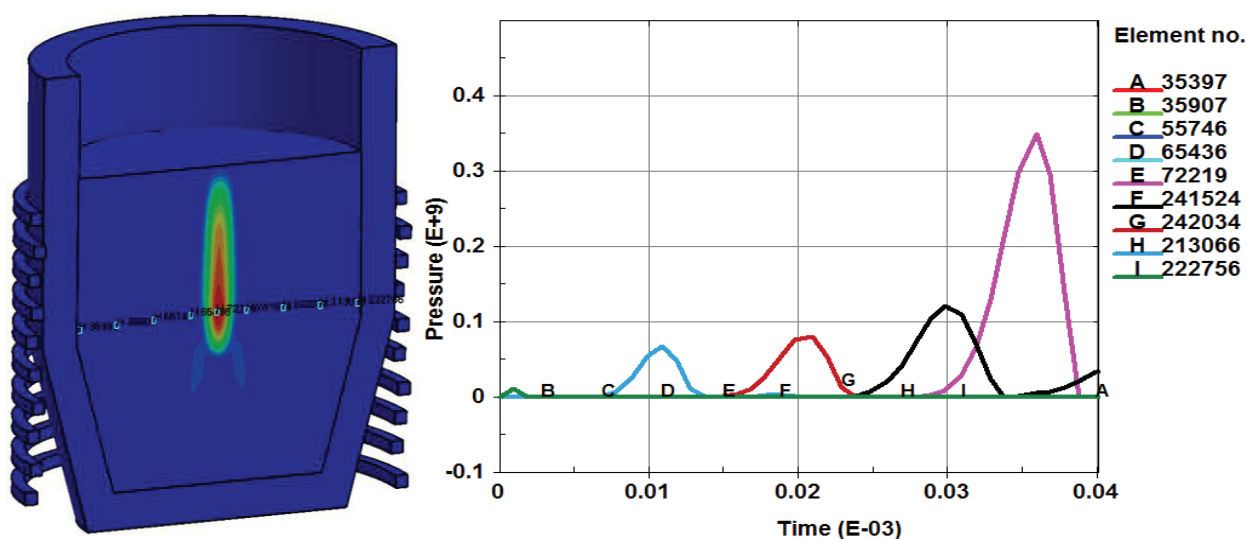


Рисунок 3.9 – Характер изменения давления ИМП от времени в характерных элементах по объему расплава при радиальной схема воздействия

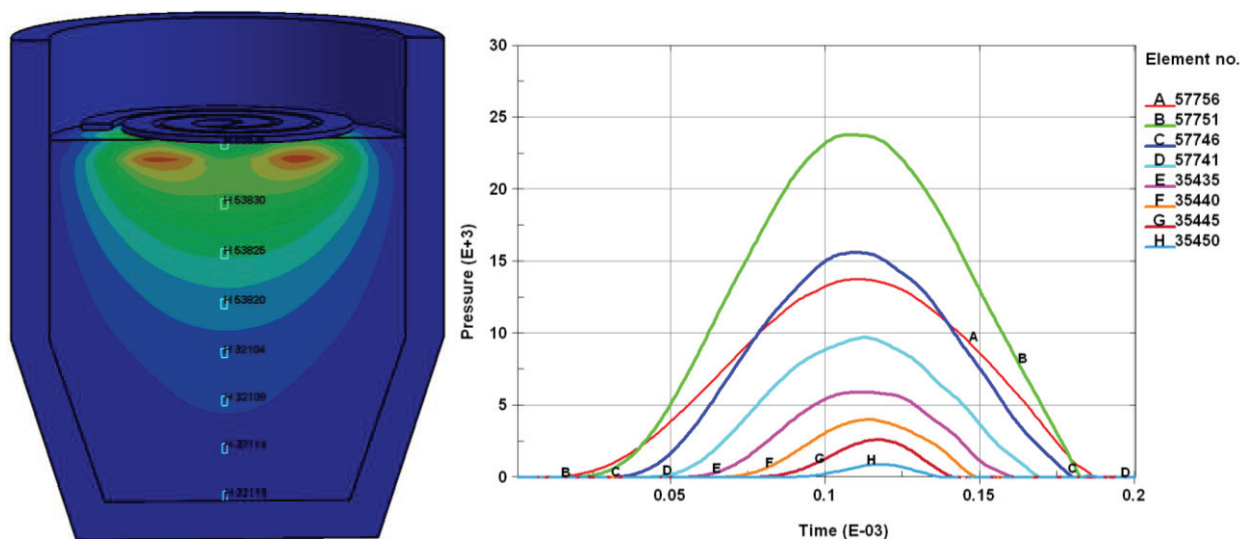


Рисунок 3.10 – Характер изменения давления ИМП от времени в характерных элементах по объему расплава при осевой схеме воздействия

Видно, что при радиальном воздействии область наибольших концентраций давления находится в центральной зоне расплава,

находящегося в тигле. При осевом воздействии давление распространяется от поверхности расплава, над которой расположен индуктор, в глубину тигля. Наличие давлений вызывает ударную волну, которая способствует возникновению металлопотоков расплава. На рисунках 3.11 и 3.12 показаны результаты моделирования по распространению ударных волн в расплаве при радиальном и осевом воздействиях. Видно, что при радиальном воздействии ударные волны распространяются от стенок тигля в центральные объемы расплава, где происходит их «схлопывание». После этого возникает, так называемая, отраженная ударная волна, распространяемая уже в обратном направлении: от центра к стенкам тигля.

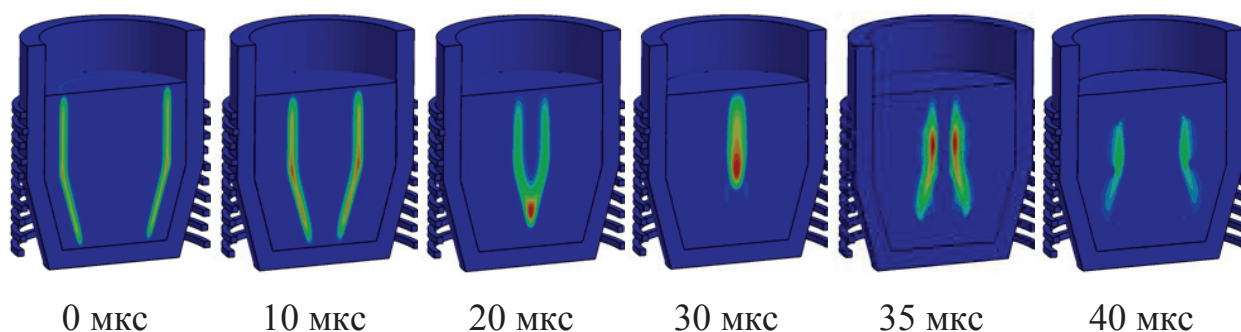


Рисунок 3.11 – Кинематика распространения ударной волны по объему расплава при радиальном воздействии

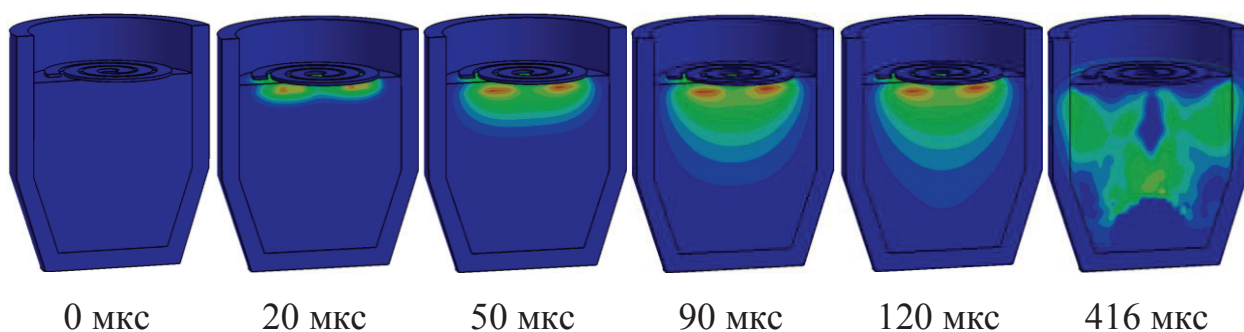


Рисунок 3.12 – Кинематика распространения ударной волны по объему расплава при осевом воздействии

О второй составляющей силового фактора МИО расплава можно судить по следующим результатам компьютерного моделирования, представленным на рисунке 3.13. Здесь показана, в качестве примера, скорость перемещения расплава в векторной форме спустя 100 мкс после начала импульса разряда для осевой схемы воздействия импульсного магнитного поля.

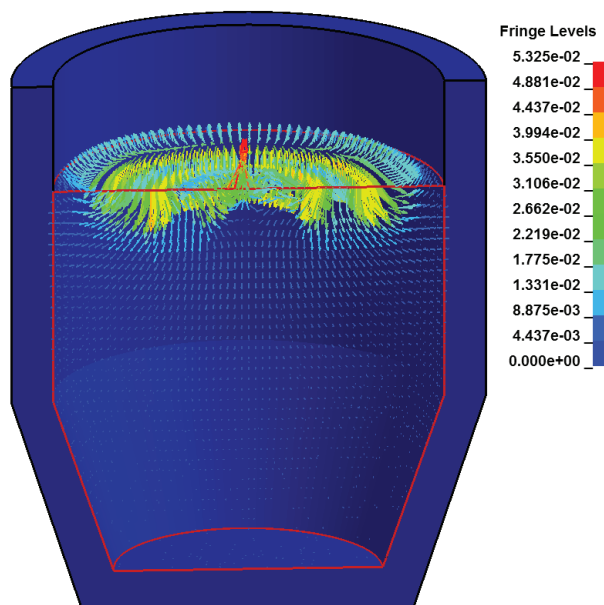


Рисунок 3.13 – Скорость перемещения расплава в векторной форме

Таким образом, результаты компьютерного моделирования подтверждают наличие силового фактора МИО расплава и позволяют оценить его роль в механизме формирования структуры и механических свойств сплава после сопоставления с результатами экспериментальных исследований.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Френкель, Я.И. Кинетическая теория жидкости [Текст] / Я.И. Френкель. – Л.: Наука, 1975. - 592 с.
- 2 Френкель, Я.И. Введение в теорию металлов [Текст] / Я.И. Френкель. –Л. – М: ОГИЗ, 1948, - 291 с.
- 3 Данилов В.И. Строение и кристаллизация жидкости [Текст] / В.И. Данилов. –Киев: Изд-во АН УССР, 1956. - 566 с.
- 4 Фрост Б.Р. Строение жидких металлов [Текст] / Б.Р. Фрост // Успехи физики металлов. – М., 1958. – С. 126-176.
- 5 Темкин, Д.Е. Жидкие металлы и их затвердевание [Текст] / Сборник статей // Д.Е. Темкин. –М.: Металлургиздат, 1962. - 434 с.
- 6 Накагава, И. Исследование вязкости жидкого чугуна [Текст] // Физико-химические основы металлургических процессов: труды сов. –японск. Симп., - М., 1969. – С. 146-165.
- 7 Кумар, Р. О структуре жидких металлов и о ее влиянии на свойства отливок [Текст] // 33-й Междунар. Конгресс литейщиков. –М., 1970. –С. 126-133.
- 8 Ашкрофт, Н. Жидкие металлы [Текст] // Успехи физ. наук. - 1970. –Т. 101, №3. –С. 519-535.
- 9 Ершов, Г.С. Строение и свойства жидких и твердых металлов [Текст] / Г.С. Ершов, В.А. Черняков –М.: Металлургия, 1978. - 248 с.
- 10 Stewart, G.W. [Текст] // Journal of Chemical Physics, 1934. - v.2, p. 417-425.
11. Eyring H. [Текст] // Chemical Education, 1963. - №40, p. 562-569.
- 12 Архаров, В.И. [Текст] / В.И. Архаров, И.А. Новохатский // Докл. АН СССР, 1969. - т. 185, №5, - С. 1069-1072.
- 13 Рыжиков, А.А. Прогрессивная технология литейного производства [Текст]/А.А. Рыжиков, И.В.Гаврилин. – Горький: Машиностроение, 1969. - 544 с.

- 14 Новохатский, И.А. Количественная оценка структурной микронеоднородности жидких металлов [Текст] / И.А. Новохатский, В.И. Архаров // Докл. АН СССР. Сер.: Химия, 1971. –Т. 201, №4. – С. 905-908.
- 15 Архаров, В.И. О квазиполикристаллической модели расплавов [Текст] / В.И. Архаров, И.А. Новохатский // Тез. науч. сообщ. всерос. конф. по строению и свойствам мет. и шлак. расплавов. – Свердловск, 1974. – С. 52-53.
- 16 Новохатский, И.А. К механизму структурных превращений в жидких металлах [Текст] / И.А. Новохатский, В.И. Архаров, В.И. Ладыанов // Докл. АН СССР. – 1982. – Т. 267, № 2. – С. 367-370.
- 17 Новохатский, И.А. Особенности проявлений различных типов структурных превращений в металлических расплавах [Текст] / И.А. Новохатский, В.З. Кисунько, В.И. Ладыанов // Изв. вузов. Черная металлургия, 1985. – №9. – С. 1-9.
- 18 Новохатский, И.А. Формирование структурной и химической микронеоднородности в бинарных металлических сплавов эвтектического типа [Текст] / И.А. Новохатский // Матер. III Всесоюз. конф. – Днепропетровск, 1986. –Т. 4. –С. 32-37.
- 19 Новохатский, И.А. Связь строения расплавов с фазовым составом многокомпонентных сплавов [Текст] / И.А. Новохатский, В.З. Кисунько // Наследственность в литых сплавах: Тез. докл. III научн.-техн. семинара. – Куйбышев, 1990. – С. 60-64.
- 20 Новохатский, И.А. Экспериментальное обоснование явления полиморфизма в металлических расплавах [Текст] / И.А. Новохатский // Наследственность в литых сплавах: тез. докл. IV межотрасл. научн.-техн. семинара. – Куйбышев, 1987. – С. 15-18.
- 21 Новохатский, И.А. О вязком течении металлических расплавов при больших перегревах [Текст] / И.А. Новохатский, В.И. Архаров, В.И. Ладыанов // Докл. АН СССР. – 1979. –Т. 247, №4. – С. 849-851.

- 22 Рыжиков, А.А. Плавление и структура жидких металлов вблизи точки плавления [Текст] / А.А. Рыжиков, И.В. Гаврилин // Тепловые процессы в отливках и формах. – М., 1972. – С. 41-48.
- 23 Гаврилин, И.В. Строение жидкого и твердого металла [Текст] / И.В. Гаврилин, Г.С. Ершов, И.К. Каллиоппин // Свойства сплавов в отливках. – М., 1975. – С. 39-46.
- 24 Гаврилин, И.В. О механизме развития химической и структурной неоднородности в жидких сплавах в связи с их строением [Текст] / И.В. Гаврилин // Наследственность в литых сплавах: тез. докл. III научн.-техн. семинара. – Куйбышев, 1987. – С. 18-19.
- 25 Гаврилин, И.В. Движущая сила формирования наследственной структуры расплавов [Текст] / И.В. Гаврилин // Наследственность в литых сплавах: тез. докл. IV межотрасл. научн.-техн. семинара. – Куйбышев, 1990. – С. 7-10.
- 26 Гаврилин, И.В. О механизме образования жидких литейных сплавов и их наследственности [Текст] / И.В. Гаврилин // Литейное производство. – 1999. №1. – С.7-9.
- 27 Гаврилин, И.В. Ликвация кремния в жидких силуминах [Текст] / И.В. Гаврилин // Литейное производство. – 1983. - №2. – С.4.
- 28 Гаврилин И.В. Седиментационный эксперимент при изучении жидких сплавов [Текст] / И.В. Гаврилин // Изв. АН СССР. Металлы. -1985. –№2. С. 66-73.
- 29 Ершов, Г.С. Строение и свойства жидких и твердых металлов [Текст] / Г.С. Ершов, В.А. Черняков. – М.: Металлургия, 1979. – 248 с.
- 30 Ершов, Г.С. Микронеоднородность металлов и сплавов [Текст] / Г.С. Ершов, Л.А. Позняк. – М.: Металлургия, 1985. -214 с.
- 31 Баум, Б.А. Металлические жидкости [Текст] / Б.А. Баум. – М.: Наука, 1979. – 120 с.
- 32 Баум, Б.А. Жидкая сталь [Текст] / Б.А. Баум, Г.А. Хасин, Г.В. Тягунов. – М.: Металлургия, 1984. – 210 с.

- 33 Тягунов, Г.В. Повышение качества высоколегированных сталей и сплавов путем совершенствования температурных режимов их расплавов [Текст]: автореферат дисс. на соиск. степени д-ра техн. наук/Тягунов Геннадий Васильевич. – Свердловск, 1984. – 47 с.
- 34 Баум, Б.А. Состояние многокомпонентной металлической системы после фазового перехода кристалл-жидкость [Текст] / Б.А. Баум, Г.В. Тягунов, Е.Е. Барышев, В.С. Цепелев // Расплавы. - 1999. - №5. - С. 32-43.
- 35 Попель, П.С. Термодинамический анализ одной из причин металлургической наследственности [Текст] / П.С. Попель, Б.А. Баум // Изв. АН СССР. Металлы. – 1986. - №5. – С. 47-51.
- 36 Попель, П.С. О происхождении микрорасслоения эвтектических сплавов Sn-Pb в жидком состоянии [Текст] / П.С. Попель, Е.А. Преснякова // Изв. АН СССР. Металлы. -1995. -№2. –С. 53-56.
- 37 Попель, П.С. Наследственная микронеоднородность жидких металлических растворов [Текст] / П.С. Попель // Тез. научн. сообщ. VI Всесоюзн. конф. по строению и свойствам металлических и шлаковых расплавов. – Свердловск, 1986. – С. 93-96.
- 38 Попель, П.С. Коллоидная и примесная микронеоднородность жидких металлических растворов [Текст]: автореф. дис. д-ра физ.-мат. Наук / Попель Петр Станиславович. – Свердловск, 1988. – 33 с.
- 39 Попель, П.С. Термодинамическое обоснование коллоидного механизма передачи структурной наследственности в силуминах [Текст] / П.С. Попель, О.А. Чикова, В.И. Никитин // Наследственность в литых сплавах: Тез. докл. IV межотрасл. научн.-техн. семинара. –Куйбышев, 1990. –С. 69-72.
- 40 Баландин, Г.Ф. Основы теории формирования отливки [Текст] / Г.Ф. Баландин. – М.: Машиностроение, 1979 г. – 328 с.
- 41 Гаврилин, И.В. Плавление и кристаллизация металлов и сплавов [Текст] / И.В. Гаврилин. – Владимир, 2000. – 260 с.
- 42 Морин, С.В. Комплексное исследование вибрационного воздействия на кристаллизацию и свойства отливок из алюминиевых сплавов [Текст]:

автореф. дис. канд. техн. наук / Морин Сергей Викторович. - ГОУ ВПО «СибГИУ». – Новокузнецк, 2005. – 22 с.

43 Ефимов, В.А. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов [Текст] / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов. – М.: Metallurgy, 1995. – 272 с.

44 Чернега, Д.Ф. Газы в цветных металлах и сплавах [Текст] / Д.Ф. Чернега, О.М. Бялик, Д.Ф. Иванчук, Г.А. Ремизов. – М.: Metallurgy, 1982. – 176 с.

45 Найдек, В.Л. Влияние способа обработки расплава на структуру и свойства алюминиевых сплавов [Текст] / В.Л. Найдек, А.В. Наривский // Литейное производство. - 2003. - №9. - С. 2-3.

46 Селянин, И.Ф. Рафинирование расплавов при использовании низкосортной шихты [Текст] / И.Ф. Селянин, В.Б. Деев, А.П. Войтков, Н.В. Башмакова // Литейщик России. - 2006. - №2. - С. 18-20.

47 Крушенко, Г.Г. Дозвтектические сплавы системы Al-Si, приготовленные из шихты, обработанной физическими методами [Текст] / Г.Г. Крушенко // Литейное производство. - 1983. - №8. - С. 10, 11.

48 Миненко, Г.Н. Об энергетическом воздействии на металлический расплав [Текст] / Г.Н. Миненко // Metallurgy машиностроения. - 2006. - №3. - С. 10-12.

49 Эльдарханов, А.С. Кавитационное разрушение границы затвердевания [Текст] / А.С. Эльдарханов // Процессы литья. - 1996. - №3. - С. 16-24.

50 Найдек, В.Л. Влияние вибрации на структуру и свойства алюминиевого сплава АК5М2 [Текст] / В.Л. Найдек, А.С. Эльдарханов, А.С. Нурадинов, Е.Д. Таранов // Литейщик России. - 2005. - №10. - С. 23-25.

51 Зуев, А.Б. К истории процесса литья в твердожидком состоянии [Текст] / А.Б. Зуев // Литейное производство. - 2003. - №4. - С. 20-23.

52 Юдин, С.Б. Центробежное литье [Текст] / С.Б. Юдин, М.М. Левин, С.Е. Розенфельд. – М.: Машиностроение, 1972. – 280 с.

- 53 Курдюмов, А.В. Фильтрование и флюсовая обработка алюминиевых расплавов [Текст] / А.В. Курдюмов, С.В. Инкин, В.С. Чулков. – М.: Metallurgy, 1980.
- 54 Добаткин, В.И. Ультразвуковая обработка расплава цветных металлов и сплавов [Текст] / В.И. Добаткин, Г.И. Эскин. - М.: Наука, 1986. – С. 6.
- 55 Шоршоров, М.Х. Теория неравновесной кристаллизации плоского слитка [Текст] / М.Х. Шоршоров, А.И. Манохин. - М.: Наука, 1992. – С. 6-22.
- 56 Баум, Б.А. О взаимосвязи свойств жидких и твердых сталей [Текст] / Б.А. Баум, Г.В. Тягунов // Проб. стального слитка. – 1976. - №6. – С.37.
- 57 Крушенко, Г.Г. Модифицирование алюминия при литье крупногабаритных слитков прутковыми лигатурами [Текст] / Г.Г. Крушенко, В.А. Балашов, З.А. Василенко // Цветные металлы. - 1989. - №2. - С. 91, 92.
- 58 Крушенко, Г.Г. Повышение механических свойств алюминиевых литейных сплавов с помощью УДП [Текст] / Г.Г. Крушенко, В.А. Балашов, З.А. Василенко // Литейное производство. - 1991. - №4. - С. 17, 18.
- 59 Деев, В.Б. Получение герметичных алюминиевых сплавов из вторичных материалов [Текст] / В.Б. Деев. – М.: Флинта: Наука, 2006. – 218 с.
- 60 Ершов, Г.С. Высокопрочные алюминиевые сплавы на основе вторичного сырья [Текст] / Г.С. Ершов, Ю.Б. Бычков. – М.: Metallurgy, 1979. – 192 с.
- 61 Деев, В.Б. Влияние структурной наследственности шихты на качество отливок из силуминов [Текст] / В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, Ю.Ф. Шульгин // Заготовительные производства в машиностроении. - 2003. - №2. - С. 4-6.
- 62 Пыцзе, Ли. Исследование наследственного влияния структуры шихты и перегрева расплава на структуру силуминов [Текст] / Ли Пыцзе, В.И. Никитин, К.В. Никитин // Литейное производство. - 2001. - №5. - С. 15-16.
- 63 Котляровский, Ф.М. Качество отливки после термовременной обработки алюминиево-кремниевых расплавов [Текст] / Ф.М. Котляровский, В.И. Белик // Литейное производство. - 1985. - №6. - С. 17-20.

- 64 Таран, Ю.Н. Влияние термоскоростной обработки жидкого расплава АК2 на свойства отливок [Текст] / Ю.Н. Таран, И.А. Новохатский, В.И. Мазур // Литейное производство. - 1985. - №7. - С. 16.
- 65 Ефимов, В.А. Специальные способы литья [Текст]: Справочник / В.А. Ефимов, Г.А. Анисович, В.Н. Бабич. – М.: Машиностроение, 1991. – 436 с.
- 66 Батышев, А.И. Кристаллизация металлов и сплавов под давлением [Текст] / А.И. Батышев. – М.: Металлургия, 1977. – 155 с.
- 67 Перелома, В.А. Лазерное воздействие на жидкое и жидкотвердое состояние алюминиевых сплавов [Текст] / В.А. Перелома, В.П. Лихошва // Литейное производство. - 1992. - №9. - с.8.
- 68 О низкоэнергетической технологии электрогидроимпульсной обработки расплава в ковше на предразливочной стадии [Электронный ресурс] / http://www.iipt.com.ua/news/news_5.htm
- 69 Ри, Э.Х. Влияние облучения жидкой фазы наносекундными электромагнитными импульсами на ее строение, процессы кристаллизации, структурообразования и свойства литейных сплавов [Текст] / Э.Х. Ри, Хосен Ри, С.В. Дорофеев, В.И. Якимов. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 177 с.
- 70 Верте, Л.А. Магнитная гидродинамика в металлургии [Текст] / Л.А. Верте. - М.: Металлургия, 1975. 288 с.
- 71 Верте, Л.А. Электромагнитная разливка и обработка жидкого металла [Текст] / Л.А. Верте. - М.: Металлургия, 1967. 206 с.
- 72 Самойлович, Ю.А. Кристаллизация слитка в электромагнитном поле [Текст] / Ю.А. Самойлович.- М.: Металлургия, 1986. 168 с.
- 73 Дорофеев, А.В. Обработка алюминиевых расплавов электротокком [Текст] / А.В. Дорофеев, А.Б. Килин, А.С. Тертишников // Литейщик России. - 2002. - №2. - с. 19-21.
- 74 Килин, А.Б. Влияние электрического тока на дегазацию и модифицирование алюминиевых сплавов [Текст] / А.Б. Килин // Литейное производство. – 2002. - №8. – с. 21-22.

- 75 Якимов, В.И. Влияние постоянного тока на качество магниевого сплава [Текст] / В.И. Якимов, В.И. Шпорт, В.И. Муравьев, А.Т. Калинин, А.В. Якимов // Литейное производство. - 1999. - №12. - с. 10-12.
- 76 Тимченко, С.Л. Влияние электрического тока на кристаллизацию алюминиевого сплава [Текст] / С.Л. Тимченко, Н.А. Задорожный // Литейное производство. - 2005. - №9. - с. 12-13.
- 77 Груздева, И.А. Влияние электромагнитного перемешивания на структуру и свойства оловянных бронз [Текст] / И.А. Груздева, А.В. Сулицин, Р.К. Мысик, Б.А. Сокунов // Литейщик России. - 2006. - №11. - С. 27-29.
- 78 Любимов, А.А. Электромагнитный способ получения слитков [Текст] / А.А. Любимов, А.С. Тertiшников // Metallurgy машиностроения. - 2004. - №4. - С. 32-36.
- 79 Лычев, А.П. Кристаллизация металлов во внешнем магнитном поле [Текст] / А.П. Лычев, А.И. Черемисин // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1978. - №11. - С. 158-161.
- 80 Микельсон, А.Э. МГД-методы и устройства в промышленности [Текст] / А.Э. Микельсон, В.М. Фолифоров // Магнитная гидродинамика. -1975. - №1. - С. 129-140.
- 81 Горшков, А.А. Применение однофазных электромагнитных насосов в литейном производстве [Текст] / А.А. Горшков, В.П. Полищук, М.Р. Цин // Литейное производство. - 1962. - №8. - С. 9.
- 82 Полищук, В.П. Заливка чугуна магнитодинамическими насосами в условиях массового изготовления гильз тракторных двигателей [Текст] / В.П. Полищук, В.К. Погорский, В.Ф. Злобин, П.И. Загоровский // Литейное производство. - 1981. - №8. - С. 23-24.
- 83 Основные понятия магнитной гидродинамики. МГД-устройства и МГД-установки [Текст]: терминология. Вып. 100. – М.: Наука, 1982. – 47 с.
- 84 Повх, И.Л. Магнитная гидродинамика в металлургии [Текст] / И.Л. Повх, А.Б. Капуста, Б.В. Чекин. – М.: Металлургия, 1974. - 240 с.

- 85 Полищук, В.П. Магнитодинамические насосы для литейного производства [Текст] / В.П. Полищук // Литейное производство. - 1978. - №2. - С. 29-31.
- 86 Дубоделов, В.И. Влияние переменного магнитного поля на диффузию в жидком алюминии [Текст] / В.И. Дубоделов, С.М. Захаров, В.Ф. Мазанко, В.М. Миронов, А.В. Миронов // Материаловедение. - 2003. - №12. - С. 27-29.
- 87 Левшин, Г.Е. Формообразование намагниченными формовочными материалами [Текст] / Г.Е. Левшин. – Барнаул: Изд-во «АлтГТУ», 2001. – 368 с.
- 88 Левшин, Г.Е. Литье в магнитные формы [Текст] / Г.Е. Левшин, И.Л. Матюшков. – Барнаул: Изд-во «АлтГТУ», 2006. – 688 с.
- 89 Полищук, В.П. Электромагнитное транспортирование и заливка в формы жидкого металла при фасонном литье магниевых сплавов [Текст] / В.П. Полищук, М.Р. Цин, В.И. Дубоделов, А.С. Зенкин // Литейное производство. - 1968. - №12. - С. 13-16.
- 90 Гецелев, З.Н. Непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор [Текст] / З.Н. Гецелев, Г.А. Балахонцев, Ф.И. Квасов, Г.В. Черепок, И.И. Варга, Г.И. Мартынов. – М.: Металлургия, 1983. – 152 с.
- 91 Мочалов, П.П. Литье в электромагнитные кристаллизаторы [Текст] / П.П. Мочалов, З.Н. Гецелев // Цветные металлы. - 1970. - №8. - С. 62-63.
- 92 Горшков, А.А. Применение однофазных электромагнитных насосов в литейном производстве [Текст] // А.А. Горшков, В.П. Полищук, М.Р. Цин // Литейное производство. - 1962. - №8. - С. 9.
- 93 Герман, Э. Непрерывное литье [Текст] / Э. Германн. – М.: Металлургиздат, 1961. – 814 с.
- 94 Гецелев, З.Н., Мартынов Г.И. О механизме образования полосчатой структуры непрерывных слитков [Текст] / З.Н. Гецелев, Г.И. Мартынов // Технология легких сплавов. - 1982. - №2. - С. 45-49.

95 Балахонцев, Г.А. О качестве поверхности слитков при литье в электромагнитный кристаллизатор [Текст] / Г.А. Балахонцев, В.И. Добаткин, Н.М. Зубова, Р.М. Сизова // Цветные металлы. - 1976. - №3. - С. 47-49.

96 Деев, В.Б. Модифицирующая обработка сплавов магнитным полем [Текст] / В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, О.И. Нохрина, В.Ф. Горюшкин, С.А. Цецорина // Литейщик России. -2008. -№ 3. -С. 23–25.

97 P. L'Eplattenier, G. Cook, C. Ascraft, M. Burger, J. Imbert and M. Worswick, "Introduction of an Electromagnetism Module in LS-DYNA for Coupled Mechanical-Thermal-Electromagnetic simulations", Steel Research Int., vol 80, no. 5, 2009.

Учебное издание

Черников Дмитрий Геннадьевич

ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ

Конспект лекций

В авторской редакции

Подписано в печать 07.04.13. Формат 60 × 84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 3,5.
Тираж 50 экз. Заказ .

Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С.П. Королева.
443086 г. Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 г. Самара, Московское шоссе, 34.