

М 316641

НА ДО
НЕ ВЫДАЕТС

Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

Шункин Владимир Никодимович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛОВ
В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Специальность № : 05.16.04 – литейное производство

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1977 г.

Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

Шункин Владимир Никодимович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛОВ
В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Специальность № : 05.16.04 - литейное производство

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1977 г.



Работа выполнена в Институте физики АН Латвийской ССР,
ВИЛСе.

Научные руководители: кандидат физико-математических
наук А.Э.Микельсон,
кандидат технических наук
Б.И.Бондарев.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
А.А.Неуструев,
кандидат технических наук
И.Л.Воробьев.

Ведущее предприятие указано в решении специализированного
Ученого Совета.

Защита состоится " " _____ 197 г. в _____ часов
на заседании специализированного Совета К-33/13 по металлове-
дению и горячей обработке металлов

Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшего технического училища имени Н.Э.Баумана по адресу:
г.Москва, 107005, 2-я Бауманская, 5.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим
выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ
им. Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан " " _____ 197 г.

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВЕТА
кандидат технических наук, доцент

М В Т У
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

Беликов О.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ. Электромагнитное поле в качестве физического способа воздействия на процесс кристаллизации изменяет структуру и способствует повышению некоторых механических свойств литых заготовок. Большое распространение получило электромагнитное перемешивание жидкой фазы слитка, в результате которого образуется мелкозернистая дендритная структура с высокой технологической пластичностью.

Однако возможности электромагнитных полей полностью не раскрыты или недостаточно выявлен механизм воздействия. Например, отсутствуют сведения об особенностях кристаллизации отливок в постоянных магнитных полях и не исследованы в ряде случаев причины снижения эффективности электромагнитного перемешивания.

Актуальной задачей работы является изучение механизма кристаллизации в электромагнитных полях и использование новых результатов исследований в технологии литья.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Изучение особенностей кристаллизации отливок из литейного сплава $Al-11,7\%Si$ в постоянных магнитных полях. Исследование условий модифицирования структуры слитков из деформируемого алюминиевого сплава Д16 и магниевое сплава МА8 в переменных магнитных полях. Разработка электромагнитных устройств (ЭМУ) повышенной эффективности для модифицирования дендритной структуры.

Исследование особенностей кристаллизации в переменных магнитных полях алюминидов Co_2Al_9 или Si - фазы с одновременным введением поверхностно-активного вещества и первичного α -твёрдого раствора с добавками изоморфных активизирующихся примесей.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для каждого раздела работы принята единая методика исследований: изучение состояния проблемы, постановка и решение задачи с выявлением основных закономерностей, проверка установленных зависимостей на модельных устройствах и окончательное фиксирование результатов в условиях промышленной технологии литья заготовок.

При решении задач использовались приближённые аналитические методы теории фильтрации, пограничного слоя, движущихся источников тепла.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. Показано, что при направленной кристаллизации в поперечном постоянном магнитном поле дендриты приобретают строгую ориентацию. Для объяснения явления введён новый безразмерный комплекс - фильтрационное число Гартмана, в структуру

которого входит проницаемость дендрита и индукция поля. Выявлена возможность управления скоростью роста непрерывной твердой фазы в направлении вектора индукции постоянного магнитного поля. Установлен безразмерный параметр, определяющий состояние роста или распада столбчатых дендритов при воздействии переменных магнитных полей. Предложен механизм кристаллизации интерметаллических соединений в жидкой фазе слитка при электромагнитном перемешивании.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ. Разработаны технологические рекомендации, расширяющие область применения электромагнитных полей в литейной технологии. По результатам исследований созданы образцы новых ЗМУ.

РЕАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ. Изготовлены и испытаны при отливке серийных плавков 2-а типа ЗМУ: двухчастотный перемешиватель на слитки из сплава Д16 размером до 0,2 м и ЗМУ с погружными магнитопроводами на слитки из сплава МА8 размерами 0,54 x 0,16 м.м.

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ. Промышленное внедрение ЗМУ с погружными магнитопроводами при отливке слитков из сплава МА8 позволило увеличить скорость литья с $7,5 \cdot 10^{-4}$ до $1,1 \cdot 10^{-3}$ м/сек, поднять выход годного по структуре до 100%. Ожидаемый технико-экономический эффект от переоснащения серийных кристаллизаторов на новое ЗМУ составит 30.000 руб./год.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Материалы диссертации были доложены и обсуждены на следующих совещаниях:

1. УІ Рижское совещание по магнитной гидродинамике, 1968 г., г. Рига.
2. Научно-техническая конференция "Современные достижения в производстве цветного литья", 1969 г., г. Ленинград.
3. ІV Всесоюзное совещание по механизму и кинетике кристаллизации, 1971 г., г. Минск.
4. УІІ Рижское совещание по магнитной гидродинамике, 1972 г., г. Рига.

ПУБЛИКАЦИИ. По теме диссертации опубликовано 9 статей и получены 3-и авторские свидетельства.

ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация изложена на 125 стр., с приложе-

нием на 130 стр. машинописного текста, содержит 73 иллюстрации, список использованной литературы из 100 наименований работ отечественных и зарубежных авторов и заключения о технико - экономической эффективности применения нового электромагнитного устройства.

ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ.

Изучение особенностей кристаллизации литых заготовок было поставлено в зависимости от динамического воздействия электромагнитных полей на течения металла в жидкой фазе. Такая фаза рассматривалась как слабо-выраженная двухфазная среда, в которой течения металла вызваны усадочной, свободной термической или вынужденной конвекцией.

Для пояснения механизма видоизменения морфологии структуры привлекались результаты исследований магнитогидродинамических явлений при магнитных числах Рейнольдса $Re_m < 1$.

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА УСАДОЧНУЮ КОНВЕКЦИЮ.

В чистом виде усадочная конвекция имеет место при направленной кристаллизации, например лопаток ТРД, и относительно дендритной структуры поверхности раздела фаз рассматривалась как фильтрационное течение Дарси в ламинарном режиме.

Для выявления основных закономерностей поставлена задача гравитационной фильтрации металла в однородном постоянном магнитном поле (рис. 1):

$$\begin{aligned} \rho g H_1^{-1} \cdot h(y, \tau) &= -\eta \kappa^{-1} \sigma - \sigma B_0^2 \sigma \\ h_\tau &= \kappa g (m \nu)^{-1} (h h_y) y \\ h(y, 0) &= H_2 + H_1, \quad h(0, \tau) = H_1 \end{aligned}$$

Решение для скорости течения имеет вид

$$v = -\kappa g [2(1 + \sigma B_0^2 \kappa \eta^{-1})]^{-1} h(y, \tau) H_1^{-1} \quad (1)$$

где κ - проницаемость фильтра, g - ускорение силы тяжести, H_1 - толщина фильтра, H_2 - высота столба жидкого металла, σ - электрическая проводимость металла, η, ν - динамическая и кинематическая вязкость, B_0 - индукция.

Магнитное поле тормозит течение и увеличивает трение на поверхности элементов фильтра пропорционально $Ha_\phi^2 = \sigma B_0^2 \kappa \eta^{-1}$, где Ha_ϕ - фильтрационное число Гартмана.

Экспериментальная проверка выражения (1) проводилась на фильтрационной модели по схеме рис. 1 при течении галлия через электропроводный фильтр. На рис. 2 приведены теоретическая и

и экспериментальная кривые 1, 2 зависимости $Re_m = f(Ha_\phi^2)$
 где $Re_m = \mu \bar{v} d$ - в качестве безразмерной скорости.

Исследовано воздействие постоянного магнитного поля на
 усадочную конвекцию, вызванную скачком плотности, при направ-
 ленной кристаллизации сплава $Al-11,7\%Si$. На рис. 2 (кривая 3)
 показана экспериментальная зависимость $\bar{v} = f(Ha_\phi^2)$, где $\bar{v}$ - без-
 размерная скорость усадочной конвекции, в фильтрационном числе
 Гартмана K - проницаемость дендритной структуры. Независимо
 от физической природы движущей силы фильтрационного течения
 ход кривых 1, 2, 3 идентичен.

Фотографии микроструктуры образцов ($\times 70$) представлены на
 рис. 3а, б. Магнитное поле с индукцией 1,0 тл при воздействии
 на усадочную конвекцию увеличило силу трения на поверхности крис-
 таллов пропорционально Ha_ϕ^2 и вызвало механическое разрушение
 вторичных дендритных ветвей.

В междендритном пространстве обломки структуры росли в
 направлении теплового потока и ориентировали положение кристаллов
 Si - фазы. В результате получено литое строение, подобное
 структуре эвтектического композита, но полученное при высоких
 скоростях роста твердой фазы $\sim 10^{-3}$ м/сек (рис. 3б).

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СВОБОДНУЮ ТЕРМИЧЕСКУЮ КОНВЕКЦИЮ.

Исследование аналитическим методом динамического воздей-
 ствия постоянного магнитного поля на свободную термическую кон-
 векцию в жидкой фазе отливки показало, что при зависимости

$Ra_2 \leq \pi^2 Ha_2^2$ конвективное течение находится в ламинарном ре-
 жиме. Здесь $Ra_2 = g \beta \Delta t r^3 \cdot (a^2)^{-1}$ - число Рэлея,
 $Ha_2 = 28,2 \sqrt{\eta}$ - число Гартмана, основанные на расстоянии " l "
 от поверхности раздела фаз до теплового центра отливки.

Экспериментальные результаты, полученные методом электро-
 магнитного измерения расхода, подтвердили установленную зависи-
 мость: скорость конвекции имела порядок 10^{-3} м/сек.

В этих условиях при затвердении отливок из алюминия и его
 сплавов обнаружены новые особенности механизма кристаллизации:
 изменение скорости роста твердой фазы и морфологии структуры в
 направлении вектора магнитной индукции.

В мелкой жидкой фазе $\frac{L}{\eta} < 1$ скорость роста замедлена,
 кристаллы имели форму столбчатых дендритов. В глубокой жидкой
 фазе $\frac{L}{\eta} > 1$ скорость роста возросла с образованием равноосных

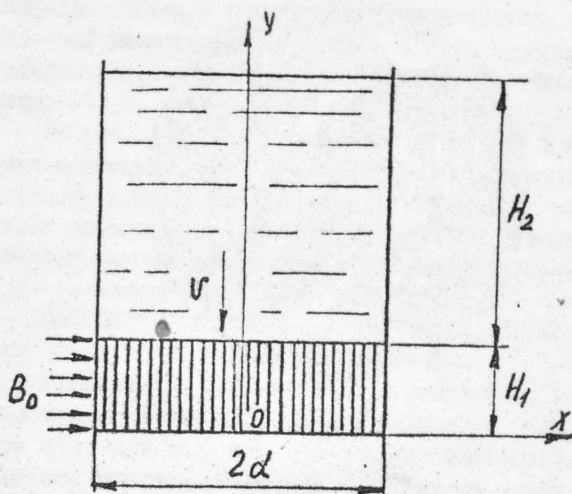


Рис. 1. Схема для постановки задачи гравитационной фильтрации.

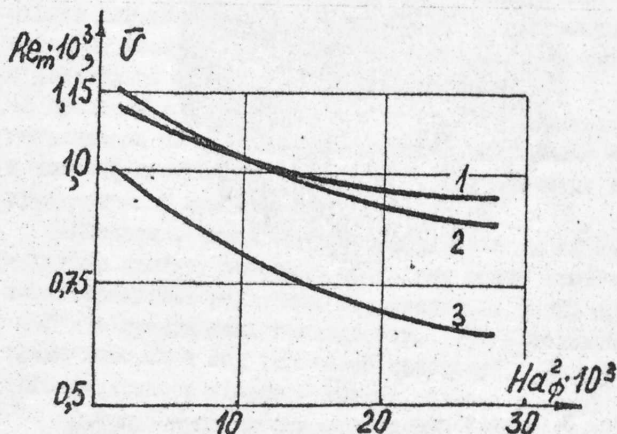
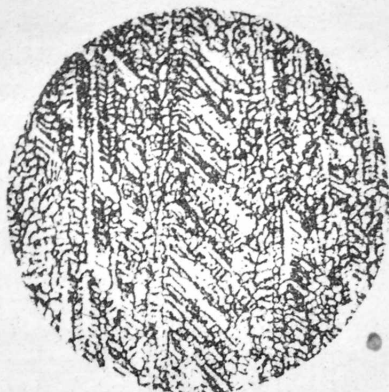
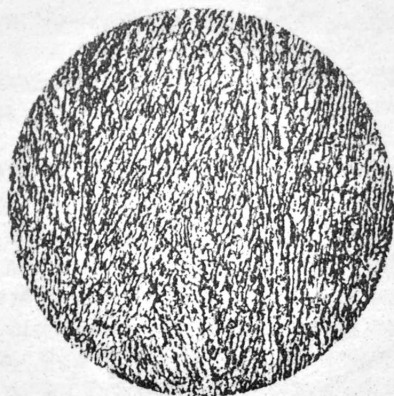


Рис. 2. Зависимость скорости гравитационной фильтрации от сопротивления фильтра $Re_m = f(Ha_\phi^2)$ (1 - расчёт, 2 - эксперимент), зависимость скорости усадочной конвекции от сопротивления дендритной структуры $\bar{u} = f(Ha_\phi^2)$ (3 - эксперимент).



а)



б)

Рис. 3. Морфология дендритной структуры сплава
Al - 11,7 % Si (x70):

а) контрольная;

б) в постоянном магнитном поле ($H_0 = 2 \cdot 10^{-2}$).

дендритов. Явление объясняется с привлечением аналогов из магнитной гидродинамики: для I случая – теплообмен вблизи вертикальной пластины, во 2 случае – теплообмен при течении в трубе.

На рис. 4 показана зависимость $\bar{\sigma} = f(\frac{e}{z})$ при затвердевании отливки из алюминия А95 в постоянном магнитном поле с индукцией 1,0 тл. Здесь $\bar{\sigma}$ – безразмерная толщина твердой фазы, равная отношению толщин миделева сечения в плоскостях, ориентированных вдоль и по нормали к магнитным силовым линиям, e – высота поверхности раздела фаз.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЖИДКУЮ ФАЗУ СЛИТКА.

Установлено, что вынужденная конвекция, возникающая при воздействии переменного электромагнитного поля аксиального индуктора на жидкую фазу слитка в непрерывном литье, при смещении со струйным течением изменяет интенсивность теплообмена между ядром жидкой фазы и поверхностью раздела фаз. Предложено разделение межфазной поверхности на зоны с определяющими видами теплообмена.

Зона I ограничена толщиной смещения при заливке центральной струей или размером среза следа "в" при заливке через литейную воронку, теплообмен происходит в направлении течения. В зоне II, ограниченной со стороны гильзы размером скин – слоя, развивается пристенное турбулентное течение с теплообменом через тепловой пограничный слой. Зона III соответствует толщине скин – слоя "Δ", в которой происходит отрыв пристенного течения с теплообменом турбулентными пульсациями.

Показано, что в зоне II при условии $\Delta + b < r_0$, где r_0 – радиус слитка, возможно состояние роста столбчатых дендритов, характеризуемое величиной безразмерного числа $Bi_{\delta} = \frac{k \delta}{h \lambda}$. Здесь k – скачок теплопроводности, δ – толщина теплового пограничного слоя над вершинкой кристалла, h – высота столбчатого дендрита в твердо – жидкой области поверхности раздела фаз.

Толщина теплового пограничного слоя определена приближенным интегральным методом теории пограничного слоя, для чего уравнения изменения количества движения, энергии и граничные условия записаны в пренебрежении к кривизне поверхности раздела фаз:

$$\frac{d}{dx} \int_0^{\delta} u^2 dy = -\frac{\tau_w}{\rho} + \frac{B_0^2}{2\mu} \cdot \frac{\delta}{\gamma_0(\delta+\delta)}; \quad \frac{d}{dx} \int_0^{\delta} (t_s - t) u dy = \frac{q_w}{\rho c_p};$$

$$\delta_T = \delta_{TA}; \quad u = u_1 \left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{2}} \quad y=0, \quad y=\delta \quad u=0;$$

$$t = t_s \left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{2}} \quad y=0 \quad t=0, \quad y=\delta \quad t=t_s;$$

$$\tau_w = 0,0228 \rho u_1^2 \left(\frac{\nu}{u_1 \delta}\right)^{\frac{1}{2}}; \quad q_w = 0,0228 \rho c_p u_1 t_s \left(\frac{\nu}{u_1 \delta}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Здесь u - скорость вынужденной конвекции, u_1 - функция, имеющая размерность скорости, τ_w - касательное напряжение трения на межфазной поверхности, q_w - тепловой поток к вершинкам кристаллов, B_0 - индукция магнитного поля, t_s - температура ядра жидкой фазы, δ_T, δ_{TA} - соответственно толщины теплового и гидродинамического пограничных слоёв; физические свойства жидкой фазы: ρ - плотность, μ - магнитная проницаемость, ν - кинематическая вязкость, c_p - удельная теплоёмкость.

Окончательное выражение для толщины теплового пограничного слоя представлено в виде

$$\delta_T = 1,85 [\gamma_0 - (\delta + \delta)]^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\nu \sqrt{\mu \rho}}{B_0} \right)^{\frac{1}{2}} \times \frac{\gamma_0}{\gamma_0}$$

Высота столбчатого дендрита получена методом движущихся источников тепла и применительно к сплаву Д16 дано соотношение

$$\delta h \cdot a^{-1} = 4,66$$

где δ - скорость литья слитка, a - коэффициент эффективной температуропроводности.

Условие $Bi_S^{-1} \rightarrow 0$ характеризует состояние распада столбчатого дендрита в следующих случаях: $\gamma_0 = \delta + \delta$ - вырожденная зона II и $\delta_T \ll h$ - интенсивное электромагнитное перемешивание жидкой фазы.

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ УСТРОЙСТВ (ЭМУ) ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ДЕНДРИТНОЙ СТРУКТУРЫ СЛИТКОВ.

Анализ условий состояния роста столбчатых дендритов в слитке при электромагнитном перемешивании позволил реализовать новую физическую идею повышения эффективности работы перемешивателей - турбулизацию жидкой фазы вблизи зоны II поверхности раздела фаз.

Были изготовлены и испытаны на серийных плавках 2 - а типа ЭМУ: двухчастотный перемешиватель с аксиальным расположением 2 - х индукторов для слитков размером до 0,2 м и ЭМ - устройство с погружными магнитопроводами для слитков сечением 0,54x0,16 м.м.

В двухчастотном перемешивателе при суперпозиции электромагнитных полей с частотами 50 и 8000 гц создан высотный градиент

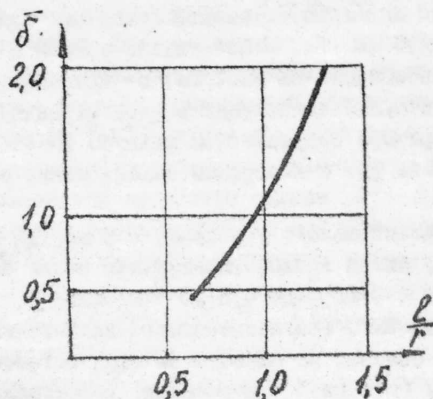


Рис. 4. Зависимость безразмерной толщины твёрдой фазы от отношения геометрических размеров формы $\bar{\delta} = f(\frac{l}{F})$

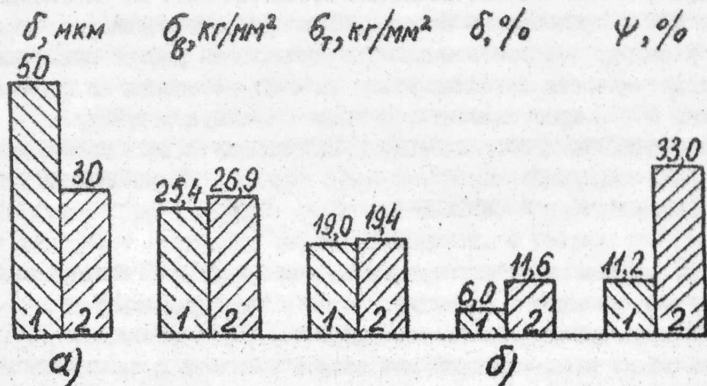


Рис. 5. а) Средний линейный размер сечения дендритной ветви $\alpha_{де}$ - твёрдого раствора (слиток $\varnothing 0,1 \text{ м}$, сплав Д16, $\bar{z} = 0,5$).

б) Диаграмма механических свойств литого состояния.

- 1 - контрольный образец,
2 - электромагнитное перемешивание 50 и 8000 гц.

гидродинамического давления от электромагнитных сил, вызывающий вихревое течение металла относительно зоны II и теплообмен турбулентными пульсациями. На рис. 5а, б приведены средние линейные размеры сечений дендритных ветвей первичного α_{Al} - твёрдого раствора при безразмерном радиусе $\bar{r} = 0,5$ в слитке $\varnothing 0,1$ м из сплава Д16 и диаграмма механических свойств литого состояния.

Повышение относительного удлинения с 6 до 11% позволило увеличить скорость литья в электромагнитных полях без появления горячих трещин с $3 \cdot 10^{-3}$ до $4,5 \cdot 10^{-3}$ м/сек.

Принцип работы ЭМУ, предназначенного для отливки слитков больших размеров, основан на физическом эффекте Томсона. Погруженные магнитопроводы (материал - пермендюр) устанавливались вблизи зоны II поверхности раздела фаз, обмотка возбуждения находилась над жидкой фазой.

При отливке слитков сечением $0,54 \times 0,16$ м.м. из магниевого сплава МА8 с применением нового ЭМУ помимо повышения скорости литья и выхода годного изыскан дополнительный резерв повышения производительности литейных машин за счёт установки на фронте разливки 6 - 4 кристаллизаторов вместо 4-х существующих.

ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ПЕРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ АЛЮМИНИДА $Co_2 Al_9$, Si - ФАЗЫ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ВВЕДЕНИИ Na И ПЕРВИЧНОГО α_{Al} - ТВЁРДОГО РАСТВОРА С ДОБАВКАМИ $AlTiZr$.

При исследовании затвердевания сплава $Al - 4\% Co$ под воздействием переменного магнитного поля в экспериментах показано, что образующиеся кристаллы алюминидов $Co_2 Al_9$ с размерами $10^{-6} + 10^{-4}$ м можно рассматривать как взвесь в жидкой фазе слитка и объяснить изменение их морфологии в зависимости от скорости вынужденной конвекции. Для характеристики динамического воздействия потока взвеси кристаллов относительно поверхности раздела фаз использован параметр инерции

$$\phi = \frac{18 \rho_2^2 u_B^2}{\rho_1 \kappa}$$

где $\rho_{1,2}$ - соответственно плотности жидкой фазы и интерметаллического соединения, u_B - скорость вынужденной конвекции (остальные обозначения - стр. 10).

Установлено, что в жидкой фазе слитка $\varnothing 0,1$ м при параметре $\phi = 1,8 \cdot 10^4$ в процессе непрерывного литья наблюдается свободный рост кристаллов $Co_2 Al_9$ до среднего размера $40 \cdot 10^{-6}$ м, с

увеличением инерционной силы $- \phi = 2,9 \cdot 10^4$ - в контакте с поверхностью раздела кристаллы механически разрушаются до размера $5 \cdot 10^{-6}$ м.

Экспериментально констатирован тот факт, что переменное магнитное поле за счёт вынужденной конвекции со скоростями течения металла $10^{-2} - 10^{-1}$ м/сек в жидкой фазе литой заготовки усиливает эффект модифицирования металлическим натрием Si - фазы в составе эвтектики литейного сплава $Al - 11,7\% Si$ до глобулярных включений размером 10^{-6} м или при одновременном введении лигатуры $AlTiZr$ изменяет параметры дендритной ячейки первичного α_{Al} - твёрдого раствора деформируемого алюминиевого сплава В96с до размера $50 \cdot 10^{-6}$ м (скорость литья 10^{-3} м/сек).

Учитывая полезность технологической операции воздействия на структуру литых заготовок с целью повышения их качества, полученные результаты по комплексному модифицированию даны в виде технологических рекомендаций.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ.

1. Кристаллизация литой заготовки в электромагнитном поле с индукцией до 1,0 тл сопровождается динамическим воздействием поля на конвективные течения в жидкой фазе.

2. При направленной кристаллизации в постоянном электромагнитном поле течение усадочной конвекции увеличивает трение на поверхности кристаллов в междендритном пространстве пропорционально $Ha_\phi^2 = \frac{B_0^2 \sigma k \eta^{-1}}{\rho}$ квадрату фильтрационного числа Гартмана и разрушает вторичные дендритные ветви. В результате отливка приобретает структуру типа эвтектического композита.

3. Морфология дендритной структуры и скорость роста твёрдой фазы в направлении вектора магнитной индукции обусловлены воздействием постоянного электромагнитного поля на течение свободной термической конвекции при зависимости чисел Рэлея и Гартмана $Ra_\tau \propto \pi^2 Ha_\tau^2$ и отношения геометрических параметров жидкой фазы отливки. Для мелкой жидкой фазы $\frac{L}{\delta} < 1$ скорость роста замедлена и образуются столбчатые дендриты, для глубокой жидкой фазы $\frac{L}{\delta} > 1$ скорость роста увеличена и образуются равноосные дендриты.

4. В сечении слитка при непрерывном литье в переменном электромагнитном поле появляются столбчатые дендриты, если размер слитка превышает суммарную величину толщины смещения и скин - слоя.

5. Разработаны и опробованы при отливке серийных сплавов

электромагнитные устройства повышенной эффективности для модифицирования дендритной структуры в виде двухчастотного перемешивателя на слитки размером до 0,2 м и устройства с погружным магнитопроводом для слитков больших размеров. На сплаве Д16 в литом состоянии получено увеличение относительного удлинения с 6 до 11%.

6. Воздействие поверхностно-активного вещества или изоморфных активирующихся примесей в присутствии переменного электромагнитного поля усиливает эффект модифицирования структурных и фазовых составляющих сплава до размеров 10^{-6} – 10^{-5} м.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ.

1. "Анализ оптимального количества экспериментов", науч.-техн. бкл. ВИСа, № 5, 1969 г.

2. "Электромагнитное перемешивание при непрерывном литье слитков сплава Д16", тезисы доклада на VI Рижском совещании по магн. гидродинамике, сентябрь, 1968 г., (Соавтор А.Э. Микельсон).

3. "К определению температурного интервала кристаллизации сплава в слитке непрерывного литья", науч.-техн. бкл. ВИСа, № 5, 1974 г. (Соавтор Б.И. Бондарев).

4. Авт. свид. № 263834 на изобретение "Электромагнитное устройство для рафинирования и модифицирования" от 3 декабря 1969 г. (Соавтор А.Э. Микельсон).

5. Авт. свид. № 268607 на изобретение "Электромагнитное устройство для модифицирования" от 3 февраля 1970 г. (Соавтор А.Э. Микельсон).

6. Авт. свид. № 319376 на изобретение "Способ перемешивания" от 12 августа 1971 г. (Соавтор А.Э. Микельсон).

7. "Исследование некоторых параметров кристаллизации в магнитных полях", тезисы доклада на IV Всесоюзном совещании по механизму и кинетике кристаллизации, октябрь, 1971 г., Минск. (Соавтор А.Э. Микельсон).

8. "Исследование скачка плотности галлия при кристаллизации во внешних магнитных полях", тезисы доклада на IV Всесоюзном совещании по механизму и кинетике кристаллизации, октябрь, 1971 г., Минск. (Соавтор А.Э. Микельсон).

9. "Исследование некоторых параметров кристаллизации в магнитных полях", Магнитная гидродинамика, № 2, 1972 г. (Соавтор А.Э. Микельсон).

10. "Исследование некоторых параметров кристаллизации в

магнитных полях", тезисы доклада на УП Рижском совещании по магн. гидродинамике, май 1972 г., Рига. (Соавтор А.Э.Микельсон).

II. "Кристаллизация жидких металлов под воздействием импульсных магнитных полей", тезисы доклада на УП Рижском совещании по магн. гидродинамике, май 1972 г., Рига. (Соавторы: - А.Э. Микельсон, Я.Х. Карклинь).

I2. "Особенности кристаллизации слитков алюминия с 4% Со в переменных магнитных полях при непрерывном литье", научн.-техн. сбл. ВИЛСа, № 5, 1975 г. (Соавтор Б.И. Бондарев).