

СПОСОБ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ КРЕМНИЯ В РАСПЛАВЕ СИЛУМИНА, КРИСТАЛЛИЗУЮЩЕГОСЯ В НЕОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Г.А. Дубский, Н.И. Мишенева, Д.М. Долгушин, А.А. Нефедьев, В.В. Маверинский

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Российская Федерация
E-mail: denisdolgushin@mail.ru*

Аннотация. Рассматривается задача управления процессом диспергирования кремния в кристаллизующемся расплаве силумина посредством неоднородного постоянного магнитного поля. Установлено, что при кристаллизации расплава силумина в неоднородном постоянном магнитном поле активируются диффузионные и конвективные потоки кремния вблизи фронта кристаллизации. Предложена физико-математическая модель процесса воздействия неоднородного постоянного магнитного поля на ионы вторичного кремния вблизи фронта кристаллизации. Рассчитан полный поток атомов (ионов) кремния, обусловленный двумя механизмами: первый – классической диффузией, обусловленной градиентом концентрации кремния на границе кристалл – расплав; второй – силовым воздействием неоднородного магнитного поля на магнитные диполи кремния вблизи фронта кристаллизации. Микроструктурный анализ шлифов образцов силумина, полученных при их кристаллизации в неоднородном постоянном магнитном поле, подтверждает эффект действия этого поля на формирование заданной структуры.

Ключевые слова: силумин; термодинамика и кинетика кристаллизации; диффузия; конвекция; неоднородное магнитное поле; кремний; потоки кремния; микроструктура.

Введение

Применение магнитных полей (постоянных однородных и неоднородных, импульсных и переменных), воздействующих на расплав сплава при его кристаллизации, с целью получения слитка или закристаллизованного изделия с заданной микроструктурой и заданным объёмным распределением атомов кремния и легирующих добавок, в настоящее время является перспективным технологическим методом модификации физико-механических свойств конструкционных металлов и сплавов [1–5].

Проведенные нами экспериментальные и теоретические исследования [6–8] влияния постоянного однородного и импульсного магнитных полей на термодинамику и кинетику кристаллизующихся в них доэвтектических и эвтектических расплавов силуминов показали, что магнитные поля увеличивают температуру фазового равновесия солидус – ликвидус (T_S) и температуру переохлаждения ($\Delta T = T_S - T_{кр}$), а также увеличивают скрытую теплоту фазового перехода q_s . Всё это приводит к тому, что в процессе кристаллизации расплава в магнитном поле формируется более мелкое зерно в слитке с более дисперсным распределением кремния в нём [6]. Таким образом, можно сделать вывод, что изменённые магнитным полем термодинамические параметры оказывают существенное влияние на кинетику процесса кристаллизации исследованных силуминов, так как и скорость зарождения центров кристаллизации, и линейная скорость роста зародыша зависят от указанных термодинамических параметров, что было неоднократно подтверждено нашими исследованиями изменения микроструктуры силуминов магнитными полями [6].

В данной работе разработана и предложена физико-математическая модель дополнительного механизма диффузии вторичного кремния, способствующего изменению микроструктуры исследованных силуминов, расплавы которых кристаллизуются в неоднородном магнитном поле.

1. Установление равновесного распределения ионов кремния в расплаве силумина в неоднородном магнитном поле

Рассмотрим расплав эвтектического силумина АК12М2Мг, находящийся в области неоднородного постоянного магнитного поля с индукцией $\vec{B}$. Необходимо рассчитать диффузионный поток ионов кремния, обусловленный действием сторонней силы $\vec{F}_m$, которая, согласно теории магнетизма, пропорциональна градиенту произведения магнитного момента атома и вектора магнитной индукции ($\text{grad}(\vec{P}_m, \vec{B})$). Для простоты примем, что сила $\vec{F}_m$ направлена вдоль оси x .

Пусть в расплаве указанного силумина вязкостью η находится n_i атомов (ионов) кремния. На каждый ион примеси будет действовать сила со стороны неоднородного постоянного магнитного поля. За счёт этой силы ионы Si перемещаются в одну сторону, создавая градиент концентрации, что приводит к появлению диффузии ионов Si в направлении, противоположном действующей магнитной силы. Через некоторое время должно установиться равновесное распределение концентрации кремния в расплаве алюминия при заданной индукции магнитного поля.

Возникшее равновесное состояние будет достигнуто за счёт равенства потоков, вызванных приложенной к атомам Si магнитной силы и противоположно направленного диффузионного потока.

Введём понятие подвижности ионов (атомов) под действием внешней силы F_m :

$$b = \frac{v}{F_m}, \quad (1)$$

где v – скорость движения атомов, которую они приобрели под действием силы F_m .

Выразив из (1) скорость частиц и умножив на их концентрацию, получим выражение для потока частиц, вызванного приложенной силой F :

$$bF_m n = vn.$$

Добавив к этому потоку поток, вызванный неоднородностью концентрации, получим уравнение стационарности концентрации частиц в состоянии равновесия:

$$bF_m n - D \frac{dn}{dx} = 0. \quad (2)$$

Или, учитывая, что $F_m = P_m \frac{dB}{dx}$, получим

$$bP_m \frac{dB}{dx} n = D \frac{dn}{dx}. \quad (3)$$

После некоторых преобразований выражения (3) окончательно получим:

$$n = n_0 \exp \left\{ \frac{bP_m B}{D} \right\}, \quad (4)$$

где n_0 – равновесная концентрация кремния в расплаве силумина в отсутствие магнитного поля, P_m – магнитный момент атомов Si, B – индукция магнитного поля, D – коэффициент диффузии кремния в расплаве силумина, обусловленный градиентом концентрации.

Формула (4) показывает стационарное распределение ионов (атомов) кремния в расплаве силумина, находящегося в неоднородном постоянном магнитном поле. Из данного распределения следует, что с ростом индукции магнитного поля B число ионов (атомов) кремния, находящихся в этом поле, изменяется, т. е. идет их отток из области с большим значением магнитной индукции или приток в эту область в зависимости от того, диамагнитный или парамагнитный ион (атом) примеси.

При кристаллизации силумина, ввиду ограниченной растворимости кремния в твёрдом растворе слитка, большая часть кремния за счёт диффузии вытесняется в расплав, образуя вблизи фронта кристаллизации избыток Si относительно его равновесной концентрации в расплаве. Концентрационный профиль избытка кремния показан на рис. 1.

Одновременно с формированием α -фазы формируется твёрдый механический раствор эвтектики, т. е. происходит одновременная кристаллизация Al и Si, каждого в своей кристаллической решётке.

Очень важно, чтобы кристаллы кремния были равномерно распределены по объёму образованного слитка. Для это необходимо за счёт внешнего силового воздействия удалять избыточный кремний от фронта кристаллизации в расплав и равномерно его там распределять. Это можно осуществить с помощью неоднородного постоянного магнитного поля.

2. Диффузионный поток атомов кремния в кристаллизующемся расплаве силумина

Наличие градиента концентрации молекул или атомов в выделенном направлении порождает поток, величина которого описывается I законом Фика:

$$\vec{j}_n = -D \text{grad}(n), \quad (5)$$

где D – коэффициент диффузии, n – концентрация молекул или атомов. Знак минус указывает на то, что $\text{grad}n$ и $\vec{j}_n$ противоположны по направлению.

Если данные молекулы или атомы (ионы) находятся в области неоднородного магнитного поля с индукцией $\vec{B}$, то со стороны этого поля на каждый атом (ион) будет действовать сила, пропорциональная $\text{grad}(\vec{P}_m, \vec{B})$, что должно изменить общий диффузионный поток, который будет складываться из концентрационного потока и потока, обусловленного магнитным полем:

$$\vec{j} = \vec{j}_n + \vec{j}_B. \quad (6)$$

Проведём расчёт $\vec{j}_B$. Рассмотрим одиночный магнитный диполь, имеющий магнитный момент $\vec{P}_m$. Энергия магнитного диполя в магнитном поле с индукцией $\vec{B}$ равна

$$W_m = -(\vec{P}_m, \vec{B}) = -P_m B \cos(\alpha), \quad (7)$$

где α – угол между векторами $\vec{P}_m$ и $\vec{B}$ (для парамагнитных атомов $\alpha = 0$, а для диамагнитных – $\alpha = \pi$).

Сила, действующая на магнитный диполь со стороны неоднородного магнитного поля, представляется в виде

$$\vec{F}_m = -\text{grad}(W_m) = \text{grad}(\vec{P}_m, \vec{B}) = P_m \text{grad}(B). \quad (8)$$

Считаем, что $P_m = \text{const}$.

При этом суммарный диффузионный поток с учётом внешней сторонней силы, действующей на магнитные моменты атомов, может быть представлен в виде

$$\vec{j} = -D \text{grad}(n) + b n \vec{F}_m, \quad (9)$$

где $\vec{F}_m$ – сторонняя сила, действующая на атом (ион) с магнитным диполем P_m , b – подвижность атомов (ионов), определяемая выражением (1).

Учитывая (8), уравнение (9) представляется в следующем виде:

$$\vec{j} = -D \text{grad}(n) + b n P_m \text{grad}(B). \quad (10)$$

Здесь $n P_m = M_m$ – намагничённость магнетика, т. е.

$$n P_m = M_m = \chi H = \chi \frac{B}{\mu_0}, \quad (11)$$

где H – напряжённость магнитного поля, χ – магнитная восприимчивость.

Подставляя (11) в (10), получим:

$$\vec{j} = -D \text{grad}(n) + b \frac{\chi}{\mu_0} B \text{grad}(B) = -D \text{grad}(n) + b \frac{\chi}{\mu_0} \frac{1}{2} \text{grad}(B^2). \quad (12)$$

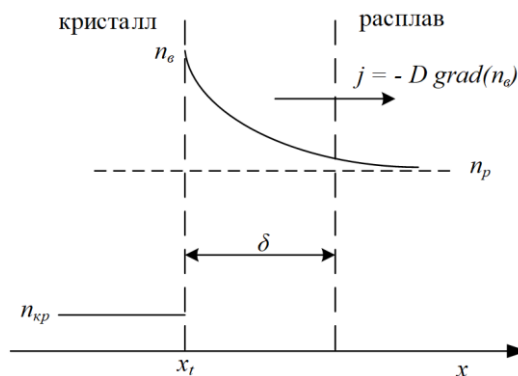


Рис. 1. Концентрационный профиль Si на границе кристалл – расплав: n_p – равновесная концентрация кремния в расплаве силумина ($n_p \approx 12\%$), $n_{кр}$ – равновесная концентрация в закристаллизованном силумине, n_e – избыточная концентрация вторичного кремния, высвобожденного из кристалла

Из соотношения Эйнштейна $D = kTb$ выразим b : $b = D/kT$, и с учётом этого окончательно суммарный диффузионный поток будет следующий:

$$\vec{j} = -D \text{grad}(n) + D \frac{\chi}{2\mu_0 kT} \text{grad}(B^2). \quad (13)$$

Анализируя уравнение (13), можно сделать следующий вывод: суммарный поток диффундирующих ионов можно как увеличить, так и уменьшить. Данное изменение потока будет определяться взаимными направлениями $\text{grad}(n)$ и $\text{grad}(B^2)$. Кроме этого, необходимо учесть, что парамагнитные атомы (ионы) втягиваются, а диамагнитные выталкиваются из области магнитного поля, поэтому поток частиц также будет зависеть от знака магнитной восприимчивости χ , т.е. суммарный поток будет зависеть от произведения $\chi \cdot \text{grad}(B^2)$.

Рассмотрим концентрационный профиль ионов кремния на границе кристалл – расплав для эвтектического силумина АК12М2Мг (см. рис. 1).

Возникающий избыток кремния, природа которого описана выше, вблизи фронта кристаллизации создаёт градиент n_s ($\text{grad}(n_s)$), направленный к фронту кристаллизации, а поток концентрации избыточного вторичного кремния n_s будет направлен в сторону расплава и его интенсивность будет определяться, во-первых, скоростью охлаждения расплава и, во-вторых, условиями возможного перемещения диффундирующих атомов (например, вакансионный механизм диффузии).

Неоднородное магнитное поле, градиент которого сформирован по направлению $\text{grad}(n_s)$, будет дополнять этот поток (атомы кремния диамагнитные), что ускорит его рассасывание в расплав, а это будет способствовать лучшему диспергированию Si в нём.

3. Расплав в неоднородном магнитном поле. Расчёт модуля магнитной индукции в области неоднородности

3.1. Схема экспериментальной установки и вывод расчетных формул для компонент магнитной индукции

Положение тигля с исследуемым расплавом силумина относительно источника неоднородного постоянного магнитного поля показано на рис. 2.

Для того чтобы большая часть объёма расплава силумина попадала в области неоднородного магнитного поля, длина катушки составляет одну треть от высоты расплава в тигле. Расположение катушки индуктивности примерно было такое, как показано на рис. 2. Максимальная напряжённость поля в центре катушки составляла $H = 78\,600$ А/м. Диаметр тигля $d = 20$ мм, высота расплава $h = 15$ см, т. е. объём расплава $V_p = 47$ см³. Время кристаллизации этого объёма силумина составляло около $t_{кр} = 123$ с. Это время определялось из термографической кривой.

Схема, представленная на рис. 2, является сильно упрощённой по отношению к реальной исследовательской экспериментальной установке, которая описана в работе [8]. Это сделано для наглядности представления потока силовых линий поля через расплав силумина.

Для оценки силового воздействия градиента магнитного поля на диамагнитный ион кремния необходимо рассчитать индукцию магнитного поля в области его неоднородности. В основу расчёта положим закон Био–Савара–Лапласа. Поскольку магнитные силовые линии имеют осевую симметрию, то удобнее рассмотреть решение задачи в цилиндрической системе координат (ρ, ϕ, z) .

Расчёт индукции магнитного поля в произвольной точке А (рис. 3) проведём для одного витка, радиуса R , по которому течёт ток I .

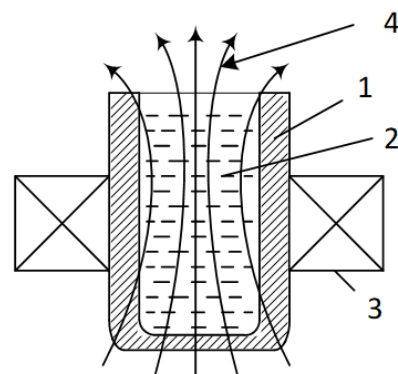


Рис. 2. Тигель с расплавом силумина в неоднородном постоянном магнитном поле: 1 – алундовый (Al_2O_3) тигель; 2 – расплав силумина; 3 – короткая катушка – источник магнитного поля; 4 – силовые линии магнитного поля

Согласно закону Био–Савара–Лапласа для элемента тока $I d\vec{l}$:

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}.$$

Записав векторы $d\vec{l}$ и $\vec{r}$ в цилиндрической системе координат и проведя необходимые преобразования, получим для компонент вектора магнитной индукции следующие выражения:

$$B_\rho = \frac{\mu\mu_0 I R}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos\phi d\phi}{(\rho^2 + R^2 + z^2 - 2\rho R \cos\phi)^{3/2}}; \quad (14)$$

$$B_\phi = 0;$$

$$B_z = \frac{\mu\mu_0 I R}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(\rho \cos\phi - R) d\phi}{(\rho^2 + R^2 + z^2 - 2\rho R \cos\phi)^{3/2}}. \quad (15)$$

Видно, что компоненты магнитной индукции зависят только от координат ρ и z .

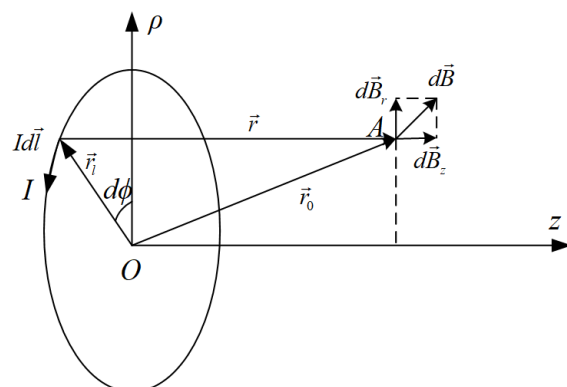
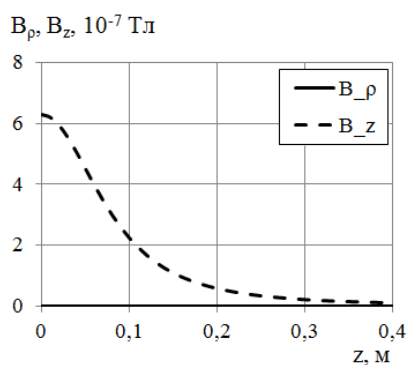


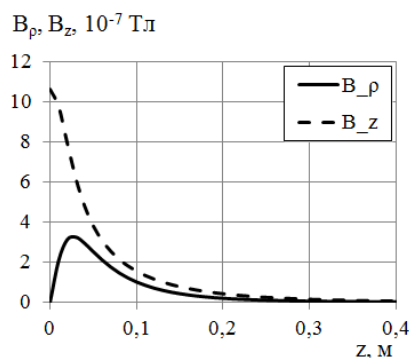
Рис. 3. Рисунок, поясняющий условие задачи расчёта в точке A от витка с током I

3.2. Результаты расчёта индукции магнитного поля в области неоднородности и их анализ

Расчёт компонент магнитной индукции по формулам (14) и (15) проводился численно с помощью компьютерной программы, по результатам вычисления которой можно построить зависимости этих компонент от координат ρ и z . Эти зависимости графически представлены на рис. 4, 5. При расчетах использовались следующие значения постоянных параметров: $\mu = 1$, $R = 0,1$ м, $I = 0,1$ А.

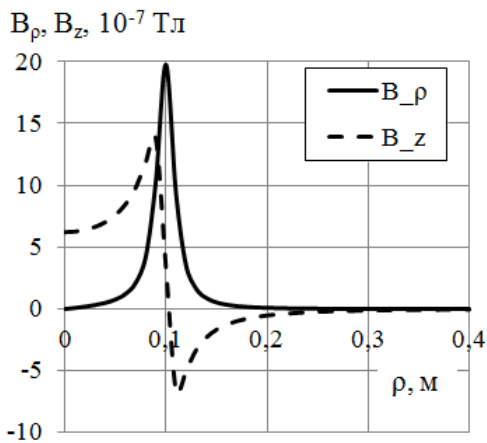


а)

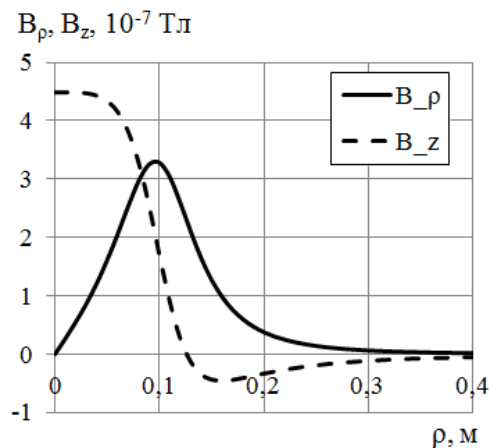


б)

Рис. 4. Зависимость компонент вектора магнитной индукции от координаты z: а) при $\rho = 0$; б) при $\rho = 0,7 \cdot R$



а)



б)

Рис. 5. Зависимость компонент вектора магнитной индукции от координаты ρ : а) при $z = 0,1 \cdot R$; б) при $z = 0,5 \cdot R$

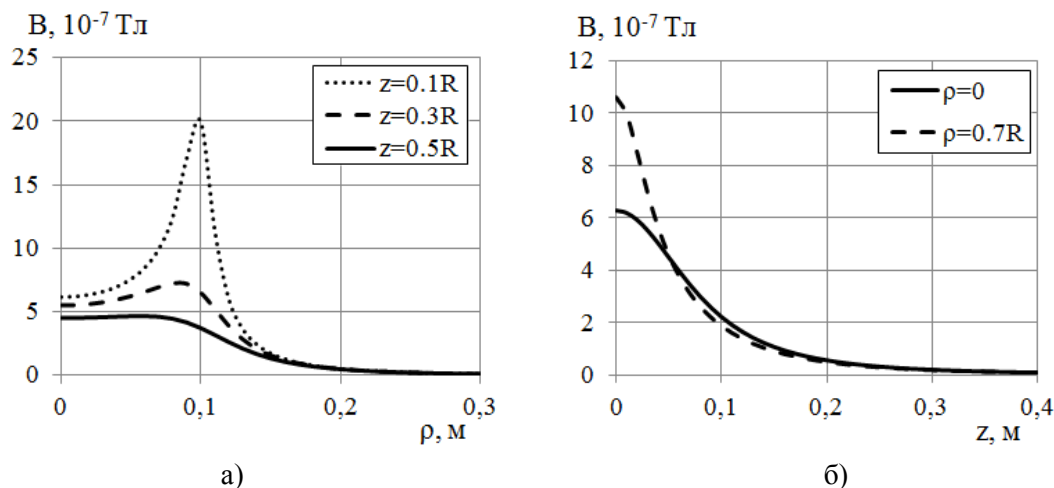


Рис. 6. Зависимость модуля вектора магнитной индукции от координат ρ (а) и z (б)

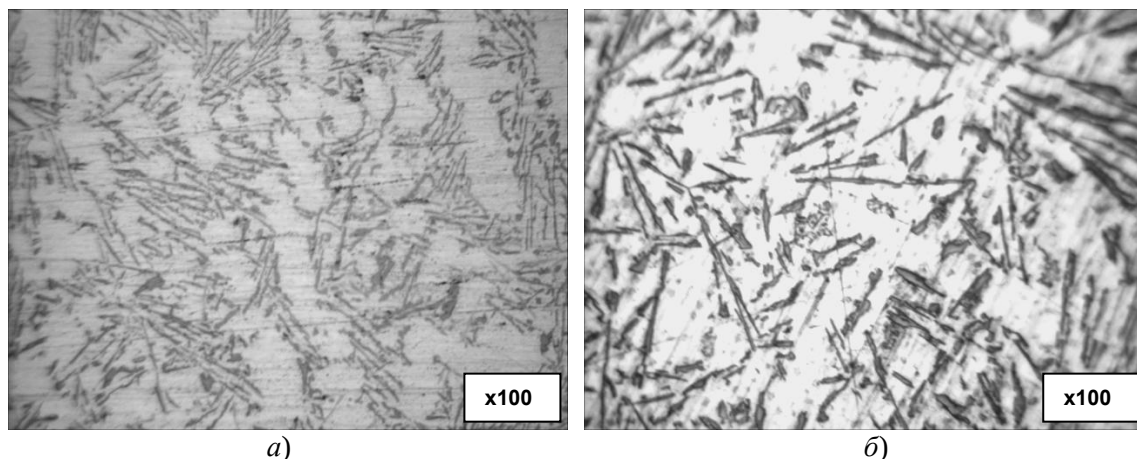


Рис. 7. Микроструктуры силумина, закристаллизованного при $B = 0$ Тл (а) и $B = 0,1$ Тл (б)

На основе полученных выражений для B_ρ , B_ϕ и B_z можно провести расчет модуля магнитной индукции. На рис. 6 представлены результаты этих расчетов в зависимости от ρ и z .

Анализ проведенных расчетов B_ρ , B_z и B , представленных на рис. 4–6, показывает, что неоднородное магнитное поле переносит избыточные ионы кремния как в направлении радиуса формирующегося цилиндрического слитка, так и в направлении z -оси тигля. Поскольку ионы кремния в расплаве являются диамагнитными, то они уносятся от стенки тигля к центру слитка, а по оси z – вверх и вниз от центра согласно конфигурации магнитного поля относительно тигля с расплавом (см. рис. 2).

Действенность неоднородного магнитного поля на процесс диспергирования Si в кристаллизующемся расплаве силумина была подтверждена экспериментально, что представлено на рис. 7. Здесь представлены фотографии микроструктуры силумина, закристаллизованного без магнитного поля и в магнитном поле. Экспериментальные результаты получены авторами работы в лаборатории физики конденсированного состояния кафедры физики МГТУ им. Г.И. Носова.

Заключение

Подводя итоги, можно сказать, что в данной работе:

1. Разработана физико-математическая модель диспергирования вторичного кремния в кристаллизующемся расплаве силумина в неоднородном постоянном магнитном поле. Эта модель позволяет объяснить различия в распределении кремния в силумине, закристаллизованном в магнитном поле и без него, а также рассчитать поток избыточного вторичного кремния, обусловленного градиентом неоднородного магнитного поля.

2. Предложен экспериментальный узел получения неоднородного магнитного поля, совмещенного с цилиндрическим тиглем, содержащим расплав силумина.

3. Представлен математический расчёт индукции неоднородного постоянного магнитного поля в цилиндрических координатах в точке сильной неоднородности поля. Полученные результаты качественно показывают направление градиента неоднородного магнитного поля и позволяют судить о направлении действия силы со стороны магнитного поля на ионы кремния в расплаве.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-22-20013, <https://rscf.ru/project/24-22-20013/>.

Литература

1. Ефимов, В.А. Технологии современной металлургии / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов. – М.: Новые технологии, 2004. – 781 с.
2. Садовский, В.Д. Магнитное поле и фазовые превращения в сталях / В.Д. Садовский // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1965. – № 7. – С. 16–18.
3. Кривоглаз, М.А. О влиянии магнитных полей на фазовые переходы / М.А. Кривоглаз, В.Д. Садовский // Физика металлов и металловедение. – 1964. – Т. 18, № 4. – С. 502–505.
4. Верте, Л.А. Электромагнитная разливка и обработка жидкого металла / Л.А. Верте. – М.: Металлургия, 1967 – 206 с.
5. Головин, Ю.И. Электромагнитные аспекты физики прочности и пластичности твердых тел / Ю. И. Головин // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 1996. – Т. 1, № 1. – С. 3–20.
6. Термодинамика и кинетика кристаллизации алюминиевых сплавов в постоянном магнитном поле / М.Б. Аркулис, Г.А. Дубский, Д.М. Долгушин, Н.И. Мишенева // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2021. – Т. 19, № 1. – С. 29–34.
7. Влияние магнитного поля на структурообразование при кристаллизации и физико-механические свойства алюминиевых сплавов / К.Н. Вдовин, Г.А. Дубский, В.Б. Деев и др. // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2019. – № 2. – С. 51–57.
8. Воздействие импульсного магнитного поля на расплав парамагнитного металла при кристаллизации / Д.М. Долгушин, Г.А. Дубский, А.А. Нефедьев и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2018. – Т. 16, № 3. – С. 57–66.

Поступила в редакцию 21 октября 2024 г.

Сведения об авторах

Дубский Геннадий Алексеевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация.

Мишенева Надежда Игоревна – старший преподаватель кафедры физики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация, e-mail: misheneva_n@mail.ru.

Долгушин Денис Михайлович – кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой физики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация, e-mail: denisdolgushin@mail.ru.

Нефедьев Александр Алексеевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры физики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация, e-mail: shuric_xp@mail.ru.

Мавринский Виктор Викторович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация, e-mail: viktormav@mail.ru.

METHOD OF DISPERSING SILICON IN A SILUMIN MELT CRYSTALLIZING IN AN INHOMOGENEOUS MAGNETIC FIELD

G.A. Dubsky, N.I. Misheneva, D.M. Dolgushin, A.A. Nefediev, V.V. Mavrinsky

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

E-mail: denisdolgushin@mail.ru

Abstract. This paper deals with the problem of controlling the process of silicon dispersion in a crystallizing silumin melt by means of an inhomogeneous permanent magnetic field. It is established that during crystallization of the silumin melt in an inhomogeneous permanent magnetic field, diffusive and convective flows of silicon are activated near the crystallization front. A physical and mathematical model of the process of influence of an inhomogeneous permanent magnetic field on secondary silicon ions near the crystallization front is proposed. The total flux of silicon atoms (ions) caused by two mechanisms is calculated: the first is classical diffusion caused by the silicon concentration gradient at the crystal-melt boundary; and the second is the force effect of an inhomogeneous magnetic field on magnetic dipoles of silicon near the crystallization front. Microstructural analysis of silumin specimen slits obtained during their crystallization in an inhomogeneous permanent magnetic field confirms the effect of this field on the formation of a given structure.

Keywords: Silumin; thermodynamics and kinetics of crystallization diffusion; convection; inhomogeneous magnetic field; silicon; silicon fluxes; microstructure.

References

1. Efimov V.A., El'darkhanov A.S. *Tekhnologii sovremennoy metallurgii* (Technologies of Modern Metallurgy). Moscow, Novye tekhnologii Publ., 2004, 781 p. (in Russ.).
2. Sadovskiy V.D. Magnitnoe pole i fazovye prevrashcheniya v stali (Magnetic Field and Phase Transformations in Steel). *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1965, no. 7, pp. 16–18. (in Russ.).
3. Krivoglas M.A., Sadovskiy V.D. O vliyani magnitnykh poley na fazovye perekhody (On the Influence of Magnetic Fields on Phase Transitions). *Fizika metallov i metallovedenie*, 1964, Vol. 18, no. 4, pp. 502–505. (in Russ.).
4. Verte L.A. *Elektromagnitnaya razlivka i obrabotka zhidkogo metalla* (Electromagnetic Casting and Processing of Liquid Metal), Moscow, Metallurgy Publ., 1967, 206 p. (in Russ.).
5. Golovin Yu.I. Elektromagnitnye aspekty fiziki prochnosti i plastichnosti tverdykh tel (Electromagnetic Aspects of Physics of Strength and Plasticity of Solids). *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 1996, Vol. 1, no 1, pp. 3–20. (in Russ.).
6. Arkulis M.B., Dubskiy G.A., Dolgushin D.M., Misheneva N.I. Termodinamika i kinetika kristallizatsii alyuminievykh splavov v postoyannom magnitnom pole (Thermodynamics and Kinetics of Crystallization of Aluminum Alloys in a Constant Magnetic Field). *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2021, Vol. 19, no. 1, pp. 29–34. (in Russ.). DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-1-29-34.
7. Vdovin K.N., Dubskiy G.A., Deev V.B., Egorova L.G., Nefediev A.A., Prusov E.S. Vliyanie magnitnogo polya na strukturoobrazovanie pri kristallizatsii i fiziko-mekhanicheskie svoystva alyuminievykh splavov (Influence of Magnetic Field on Structure Formation at Crystallization and Physical-Mechanical Properties of Aluminum Alloys). *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*, 2019, no. 2, pp. 51–57. (in Russ.). DOI 10.17073/0021-3438-2019-2-51-57.
8. Dolgushin D.M., Dubskiy G.A., Nefed'ev A.A., Rive V.V., Dolgushina O.V., Kayper A. Vozdeystvie impul'snogo magnitnogo polya na rasplav paramagnitnogo metalla pri kristallizatsii (Effect of Pulsed Magnetic Field on Paramagnetic Melt During Crystallization). *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2018, Vol. 16, no. 3, pp. 57–66. (in Russ.). DOI 10.18503/1995-2732-2018-16-3-57-66.

Received October 21, 2024

Information about the authors

Dubsky Gennady Alekseevich is Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation.

Misheneva Nadezhda Igorevna, Senior Lecturer, Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation, e-mail: misheneva_n@mail.ru.

Dolgushin Denis Mikhailovich is Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of the Physics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation, e-mail: denisdolgushin@mail.ru.

Nefediev Alexander Alekseevich is Cand. Sc. (Engineering), Senior Lecturer, Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation, e-mail: shuric_xp@mail.ru.

Mavrinsky Viktor Vktorovich is Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation, e-mail: viktormav@mail.ru.