

ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 532.78:[669.13-404:621.7.044.7]

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4\(37\)-61-66](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4(37)-61-66)Аркулис М.Б.¹, Велюс Л.М.¹, Цейтлин М.Н.², Логунова О.С.¹¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова² Ариэльский университет

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОБРАЗОВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ БЛИЖНЕГО ПОРЯДКА В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВАХ

Целью исследования является теоретическое обоснование процесса образования зародышей кристаллитов в жидком чугуне. Для решения поставленной задачи авторами рассматривается образование некоторого объема V_0 жидкости как результат действия принципа стационарности энергии этого объема. Выдвинута *флуктуационная* гипотеза: области ближнего порядка образуются в объеме жидкости (металлического расплава) за счет флуктуаций температуры, и температура области ближнего порядка есть в течение времени кристаллизации флуктуация температуры вблизи нуля по шкале Кельвина. После образования области ближнего порядка происходит выравнивание температуры области и жидкости. Исследования проведены для вещества в жидком состоянии, в частности для чугуна в парамагнитном состоянии при температуре плавления. Приведен аналитический вывод значения флуктуации температуры. Определена средняя флуктуация температуры расплава и количество атомов в области ближнего порядка для чугуна. Получены выражения для определения среднего количества атомов в области ближнего порядка для кристаллизующегося чугуна. Для получения закономерности использованы методы статистической физики, теории вероятности и математической статистики. Определена добавочная энергия при импульсном воздействии магнитного поля на расплав. Результаты исследования показали, что области ближнего порядка содержат достаточно большое количество атомов для того, чтобы взаимодействие с импульсным магнитным полем приводило к увеличению числа зародышей кристаллов и уменьшению их размеров. Полученные результаты применимы для принятия решений по проведению технологических мероприятий, направленных на получение однородной структуры металлов, в частности в черной и цветной металлургии.

Ключевые слова: математическая модель флуктуации, кристаллизация металлических расплавов, импульсное магнитное поле, область ближнего порядка, энергия теплового движения.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач металлургических процессов является получение структурно-фазового однородного металла с изотропией механических свойств. Решение этой задачи достигается на основе снижения микронегоднородности кристаллической структуры металлов и существенным образом зависит от выбранных внешних воздействий на кристаллизующийся расплав. Одним из видов воздействий на металлический расплав является применение импульсного магнитного поля [1-4].

В рамках предлагаемого исследования под областью ближнего порядка в металлических расплавах принято считать область небольшого объема по сравнению со всей жидкостью, в которой атомы образуют кристаллическую решетку, находящуюся в термодинамическом равновесии со всей жидкостью (**рис. 1**). Эта область движется хаотически подобно молекуле идеального газа. В рамках исследования в качестве металлического расплава рассматривается жидкий чугун, который обладает парамагнитными свойствами.

Исследованию процессов, сопутствующих образованию областей ближнего порядка при кристаллизации расплавов, посвящено множество работ. Одним из управляющих воздействий, которое может быть оказано на металлический расплав, является магнитное поле. В работе [5] авторы рассматривали математическую модель влияния импульсного магнитного поля на процесс образования зародышей

кристаллитов в жидком чугуне. В качестве основополагающей теории выбрана статистика Максвелла-Больцмана. Центрами образования зародышей кристаллов являются области ближнего порядка. Процесс образования области ближнего порядка рассматривается как факт без объяснения химических и физических причин.

Наиболее близкими к приведенным исследованиям можно считать работы, проведенные международным коллективом авторов в составе M.V. Petrik, O.I. Gorbатов и Yu.N. Gornostyrev. В работах [6] и [7] авторы рассматривают влияние магнетизма на формирование ближнего порядка в сплаве *Fe-Ga* и на энергию растворения различных элементов в железе. В работе [6] авторы не рассматривают:

- математическую модель влияния флуктуаций температуры на формирование области ближнего порядка с учетом принципа стационарности;
- математическую модель влияния флуктуаций температуры на размер и объем области ближнего порядка;
- соотношение объемной и поверхностной энергий как фактор образования области ближнего порядка;
- соотношение энергий магнитодипольного взаимодействия областей ближнего порядка с внешним магнитным полем и теплового движения, а именно $\Delta W/(k \cdot T_0)$ с учетом размеров области ближнего порядка, где ΔW – энергия магнитного дипольного момента, Дж; k – постоянная Больцмана, Дж/К; T_0 – равновесная температура термодинамической системы, К.

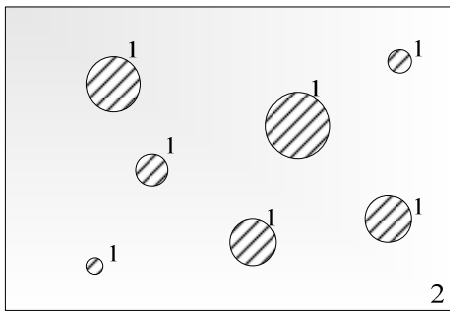


Рис. 1. Схема областей ближнего порядка в металлическом расплаве: 1 – области ближнего порядка с атомными плоскостями; 2 – выделенный объем жидкости

Учитывая недостатки предыдущих исследований [4-7], в настоящей работе авторы поставили задачу теоретического объяснения и построения математической модели процесса образования областей ближнего порядка в металлических расплавах на основе принципа стационарности и флуктуационной гипотезы. Для решения поставленной задачи авторами предлагается гипотеза: *области ближнего порядка образуются в объеме жидкости (металлического расплава) за счет флуктуаций температуры и температура области ближнего порядка есть флуктуация температуры вблизи нуля по шкале Кельвина*. После образования области ближнего порядка происходит выравнивание температуры области и жидкости.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕГО КОЛИЧЕСТВА АТОМОВ В ОБЛАСТИ БЛИЖНЕГО ПОРЯДКА

Рассмотрим образование некоторого объема V_0 жидкости как результат действия принципа стационарности энергии этого объема

$$U(V) = wV - \alpha V^{2/3}, \quad (1)$$

где V – объем выделенной жидкости, м^3 ; w – объемная плотность энергии, Дж/м^3 ; α – эффективный коэффициент поверхностного натяжения, Дж/м^2 .

Введение эффективного коэффициента поверхностного натяжения связано с тем, что площадь поверхности S , ограничивающей объем V , не равна в точности $V^{2/3}$, а только пропорциональна этой величине

$$S = \kappa V^{2/3}, \quad (2)$$

где κ – коэффициент пропорциональности.

Если для моделирования ввести допущение, что форма области ближнего порядка близка к форме шара, то получим

$$V^{2/3} = \left(\frac{4\pi}{3}\right)^{2/3} r^2 = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{4\pi}{3}\right)^{2/3} 4\pi r^2 = \frac{1}{\kappa} S,$$

$$\kappa = 4\pi \left(\frac{4\pi}{3}\right)^{-2/3} \approx 4,83,$$

где r – радиус шара, м.

В таблице представлены результаты определения коэффициента пропорциональности согласно (2) для тел Платона и шара, к которым может быть близка форма области ближнего порядка.

Значения коэффициента пропорциональности
для тел Платона и шара

Название тела	Значение коэффициента
Тетраэдр	7,21
Гексаэдр	6,00
Октаэдр	5,72
Додекаэдр	5,31
Икосаэдр	5,15
Шар	4,83

Результаты моделирования, приведенные в таблице, показывают, что для правильных многогранников и шара $\kappa > 1$. Для шара значение коэффициента достигает $\kappa \approx 4,83$.

В (1) используется эффективный коэффициент поверхностного натяжения, для которого выполняется соотношение

$$\alpha = \kappa \cdot \alpha_0, \quad (3)$$

где α_0 – истинный коэффициент поверхностного натяжения, Дж/м^2 .

Для жидкого чугуна при температуре плавления $T_0 = 1500 \text{ К}$ значение коэффициента составляет $\alpha_0 = 1 \text{ Дж/м}^2$. Предполагая, что область ближнего порядка принимает с равной вероятностью одну из форм, указанную в таблице, среднее значение для коэффициента пропорциональности $\langle \kappa \rangle \approx 5,7$. Полученное среднее значение коэффициента наиболее близко соотносится со значением коэффициента пропорциональности для октаэдра. В дальнейших рассуждениях принимаем $\kappa=1$. Любое увеличение значения коэффициента приводит к возрастанию количества атомов в области ближнего порядка.

Дифференцируя выражение (1) и приравнявая нулю производную, получаем стационарное значение для выделенного объема

$$V_0^{1/3} = \frac{2\alpha}{3w}. \quad (4)$$

Величина $V_0^{1/3}$ является характерным размером выделенного объема области ближнего порядка. Формула (4) показывает, что размер выделенного объема определяется объемной плотностью энергии этого объема жидкости, образующего область ближнего порядка. Попытки найти взаимосвязь между объемной плотностью энергии и параметрами электрического или магнитного полей привели к тому, что значение $V_0^{1/3}$ оказывается соизмеримым (или даже меньшим) с размерами постоянной периода кристаллической ячейки $a = 2,37 \cdot 10^{-10} \text{ м}$. Это противоречит понятию области ближнего порядка. Поэтому величина объемной плотности энергии не может иметь электромагнитной природы.

Согласно теории флуктуаций [8, 9] плотность вероятности того, что температура подсистемы испытает флуктуацию и её температура будет лежать в интервале от некоторой T до $T + dT$, равна

$$\frac{dP}{dT} = \sqrt{\frac{C_V}{2\pi k T_0^2}} \cdot \exp \left\{ -\frac{C_V (T - T_0)^2}{2k T_0^2} \right\}, \quad (5)$$

где P – вероятность возникновения флуктуации температуры в подсистеме; C_V – теплоемкость при постоянном объеме, приходящаяся на один атом, Дж/К; T_0 – равновесная температура термодинамической системы, К.

Для моделирования допустим, что температура области ближнего порядка равна флуктуации

$$T = \sigma_T, \quad (6)$$

где σ_T – средняя квадратичная флуктуация температуры, К.

Как известно, дисперсия случайной величины x определяется соотношением [12]

$$D_x = \sigma_x^2 = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2,$$

где D_x – дисперсия случайной величины; σ_x – флуктуация случайной величины; $\langle x^2 \rangle$ – среднее значение квадрата случайной величины; $\langle x \rangle^2$ – квадрат среднего значения случайной величины.

Поэтому, если $\langle x \rangle = 0$, то $\sigma_x^2 = \langle x^2 \rangle$. В нашем случае следует принять флуктуацию температуры вблизи $T = 0$ К. Это послужило основанием для записи выражения (6). Для условий, принятых в настоящем исследовании, $T_0 = 1500$ К – температура жидкого чугуна. Наличие флуктуаций температуры позволяет найти объемную плотность энергии в виде

$$w = k \sigma_T n = \frac{\rho R}{\mu} \sigma_T = 10^6 \sigma_T, \quad (7)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $\rho = 7 \cdot 10^3$ кг/м³ – плотность жидкого чугуна; $\mu = 56 \cdot 10^{-3}$ кг/моль – молярная масса железа; $R = 8,31$ Дж/К · моль – универсальная газовая постоянная; n – концентрация, м⁻³.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Согласно теории флуктуаций [8, 9] величина температуры области ближнего порядка принимает значения из (0; T_0). На **рис. 2** и **3** приведены результаты моделирования для определения значений объемной плотности энергии (7), выделенного объема (4) и среднего количества атомов в области ближнего порядка:

$$\langle v \rangle = \frac{V_0}{a^3}, \quad (8)$$

где $\langle v \rangle$ – среднее количество атомов в области ближнего порядка, шт.; a – период кристаллической решетки, м.

Результаты моделирования, приведенные на **рис. 3**, показывают, что предполагаемое количество атомов в области ближнего порядка уменьшается с ростом температуры расплава.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕЙ ФЛУКТУАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ РАСПЛАВА И КОЛИЧЕСТВА АТОМОВ В ОБЛАСТИ БЛИЖНЕГО ПОРЯДКА ДЛЯ ЧУГУНА

Используя закон Дюлонга и Пти, возможно определить теплоемкость расплава при постоянном объеме, приходящуюся на один атом:

$$C_V = \frac{3R}{N_A} = 3k, \quad (9)$$

где C_V – теплоемкость расплава при постоянном объеме, Дж/К; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(К·моль); $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – число Авогадро.

Запишем (5) с учетом выражения (9):

$$dP = \sqrt{\frac{3}{2\pi T_0^2}} \cdot \exp\left\{-\frac{3}{2} \cdot \left(\frac{T_0 - T}{T_0}\right)^2\right\} dT. \quad (10)$$

По определению среднего значения величины x^2 получаем

$$\langle x^2 \rangle = \int_{x_1}^{x_2} x^2 dP. \quad (11)$$

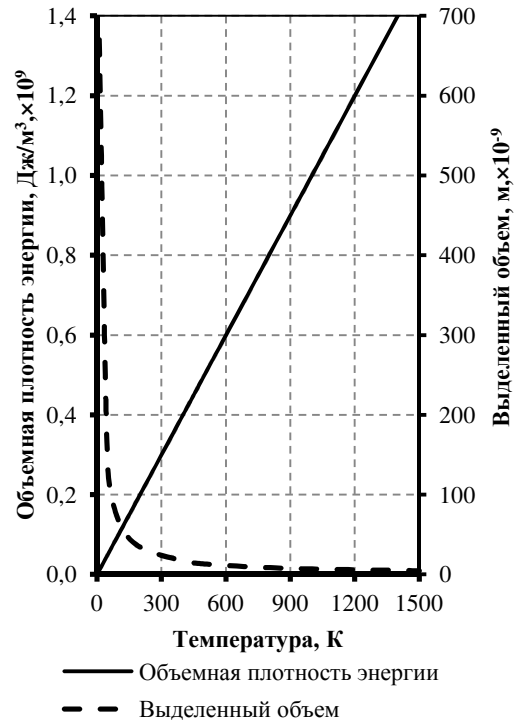


Рис. 2. Зависимость объемной плотности энергии (7) и выделенного объема области ближнего порядка (4) от температуры расплава

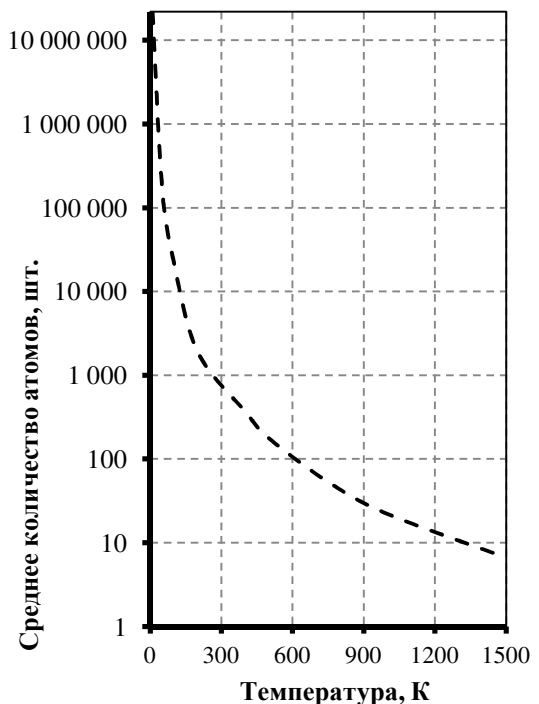


Рис. 3. Зависимость среднего количества атомов (8) в области ближнего порядка от температуры жидкого чугуна

Пределы интегрирования для (11):

$$x_1 = 0 \text{ при } T = T_0, \quad x_2 = \sqrt{\frac{3}{2}} \text{ при } T = 0 \text{ К.}$$

После подстановки в (11) находим $\langle x^2 \rangle$

$$\langle x^2 \rangle = \sqrt{\frac{1}{\pi}} \int_0^{\sqrt{\frac{3}{2}}} x^2 e^{-x^2} dx = 0,147. \quad (12)$$

В результате после интегрирования получаем

$$\langle \left(\frac{T-T_0}{T_0} \right)^2 \rangle = \frac{2}{3} \cdot 0,147 = 0,098. \quad (13)$$

Средняя квадратичная флуктуация температуры в области ближнего порядка составляет

$$\sigma_T = \sqrt{\langle (T - T_0)^2 \rangle} = \sqrt{0,098} T_0 = 0,313 T_0. \quad (14)$$

Полагая для расплавленного чугуна $T_0 = 1500 \text{ К}$, получаем:

$$\sigma_T = 0,313 \cdot 1500 = 470 \text{ К.}$$

Полученный результат есть средняя температура области ближнего порядка сразу после ее образования. Используя (7), определим

– объемную плотность энергии

$$w = \frac{\rho R}{\mu} = \sigma_T 10^6 = 4,7 \cdot 10^8 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3};$$

– средний размер области ближнего порядка

$$V_0^{1/3} = \frac{2\alpha}{3w} = 1,42 \cdot 10^{-9} \text{ м};$$

– среднее количество атомов в области ближнего порядка

$$\langle v \rangle = \frac{V_0}{a^3} = \left(\frac{1,42 \cdot 10^{-9}}{2,37 \cdot 10^{-10}} \right)^3 \approx 215.$$

Согласно известным данным [6] среднее количество атомов в области ближнего порядка составляет 3-4 атома. Результаты вычислений (9)-(14) показали, что это количество может быть на два порядка больше.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ДОБАВОЧНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА РАСПЛАВ ЧУГУНА

Средняя проекция магнитного момента области ближнего порядка на вектор индукции магнитного поля определяется выражением [1]

$$\langle p_{mz} \rangle = \langle v \rangle \cdot 2,06 \cdot 10^{-23}, \quad (15)$$

где p_{mz} – проекция магнитного момента атома железа на направление вектора индукции [1], А·м².

Значение добавочной энергии на одну область ближнего порядка составляет

$$\Delta W = \langle p_{mz} \rangle \cdot B \cdot Z = \langle v \rangle \cdot 2,06 \cdot 10^{-23} \cdot Z \cdot B, \quad (16)$$

где ΔW – значение добавочной энергии, Дж; B – индукция магнитного поля, Тл; Z – количество магнитных импульсов за время кристаллизации расплава, шт.

При однократном воздействии ($Z=1$)

$$\Delta W = 215 \cdot 2,06 \cdot 10^{-23} \cdot 1 \cdot B = 443 \cdot 10^{-23} B \text{ Дж.}$$

При определенном значении индукции магнитного поля величина добавочной энергии становится соизмеримой с энергией kT_0 . Например, при $B = 0,5 \text{ Тл}$

$$\frac{\Delta W}{kT_0} = \frac{443,96 \cdot 10^{-23} \cdot 0,5}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1500} = 0,11.$$

Если область ближнего порядка является октаэдром, то при том же значении индукции получаем $5,7 \cdot 0,11 = 0,627$. Тот же результат будет в том случае, когда совокупность областей ближнего порядка состоит из равновероятных тел Платона и шаров. Поэтому эффект увеличения числа зародышей вполне возможен. В работе [5] показано, что при этом уменьшаются размеры кристаллитов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Теоретический анализ ранее проведенных работ показал, что авторы не рассматривали математические модели влияния флуктуаций температуры на размер и объем области ближнего порядка; соотношение объемной и поверхностной энергий как фактор образования области ближнего порядка; соотношение энергий магнитодипольного взаимодействия областей ближнего порядка с внешним магнитным полем и теплового движения.

2. Для устранения недостатков в ранее проведенных исследованиях авторы работы предложили теоретическое объяснение и математическую модель образования областей ближнего порядка в металлических расплавах на основе гипотезы: области ближнего порядка образуются в объеме жидкости (металлического расплава) за счет флуктуаций температуры и температура области ближнего порядка есть флуктуация температуры вблизи нуля по шкале Кельвина.

3. Результаты вычислительного эксперимента показали, что количество атомов в области ближнего порядка, в момент её образования, может достигать 200-400, в отличие от результатов, приведенных в [6].

4. Результаты математического моделирования показали, что энергетическая добавка порядка $0,6kT_0$, даже при однократном воздействии, оказывает существенное влияние на процесс кристаллизации расплава, в том числе чугуна. Увеличение числа электромагнитных импульсов до нескольких десятков за время кристаллизации расплава позволяет предотвратить дендритный рост и повысить микрооднородность металла. Эксперименты, проводимые различными лабораториями, подтверждают эффект повышения микрооднородности при импульсном магнитном воздействии [11-16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yajchikov I.M., Devyatov D.Kh., Logunova O.S., Portnova I.V. Investigating the macrokinetics of the process of metal reduction from its oxides with the use of the pulsing plasma jets // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Chernaya Metallurgiya. 2002. № 7. P. 17-19.
2. Kolokoltsev V.M., Vdovin K.N., Mayorova T.V., Ponomareva O.S. Ecological indicators in the system of non-financial reporting at industrial enterprises // CIS Iron and Steel Review. 2017. doi: 10.17580/cisir.2017.01.01

3. Vdovin K.N., Pivovarov K.G., Lisovskaya M.A. The Use of Thermal Analysis to Study the Structure and Properties of Roll Steels // *Metal Science and Heat Treatment*. 2014. № 6. P. 22-25.
4. Chukin M., Polyakova M., Gulin A., Nikitenko O. The possibility of manufacturing long-length metal products with ultra-fine grain structure by combination of strain effects // *Key Engineering Materials*. 2016. Vol. 685. P. 487-491. doi: 10.4028 / www.scientific.net / KEM.685.487.
5. Аркулис М.Б., Велюс Л.М., Савченко Ю.И. К вопросу управления процессом кристаллизации чугуна импульсным магнитным полем // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. № 3. С. 66-68.
6. Petrik M.V., Gorbato O.I., Gornostyrev Yu.N. Role of Magnetism in the Formation of a ShortRange Order in an Fe-Ga Alloy // *JETP Letters*. 2013. Vol. 98. No. 12. P. 809-812.
7. Petrik M.V., Gorbato O.I. and Gornostyrev Yu.N. Effect of Magnetism on the Solution Energy of 3p(Al, Si) and 4p(Ga, Ge) Elements in Iron // *The Physics of Metals and Metallography*. 2013. Vol. 114. No. 11. P. 885-892.
8. Левич В.Г. Курс теоретической физики. М.: Наука, 1969. Т. 1. С. 582-588.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Гостехиздат, 1951. С. 372.
10. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1985. 512 с.
11. Черников Д.Г. Разработка физического способа модифицирования литейных алюминиевых сплавов магнитно-импульсной обработкой // *Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии»*. 2009. Вып. № 2-3/274(560). С. 87-92.
12. О магнитно-импульсной обработке расплава силумина АК9Т / Глушников В.А., Гречников Ф.В., Иголкин А.Ю., Никитин В.И., Никитин К.В. // *Литейное производство*. 2011. № 9. С. 8-11.
13. Левин М.Н., Постников В.В., Матвеев Н.Н. Влияние импульсной магнитной обработки на кристаллизацию гибкоцепных полимеров // *Высокомолекулярное соединение А*. 2003. Т.45. № 2. С. 217-223.
14. Воздействие слабых импульсных магнитных полей на модифицированную древесину / Постников В.В., Левин М.Н., Матвеев Н.Н., Скориданов Р.В., Камалова Н.С., Шамаев В.А. // *Письма в журнал технической физики*. 2005. Т. 31. Вып. 9. С. 14-19.
15. Алексеев В.И. Возможности влияния импульсного магнитного поля на структурные состояния в оксидном стекле // *Журнал технической физики*. 1998. Т. 68. № 10. С. 50-54.
16. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 1972. 360 с.

Поступила в редакцию 14 июня 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

MATHEMATICAL MODEL AND RESULTS OF A NUMERICAL SWARM EXPERIMENT ON THE EFFECT OF A MAGNETIC FIELD ON THE FORMATION OF SHORT-RANGE ORDER REGIONS IN METALLIC MELTS

Mikhail B. Arkulis

Ph.D., Assistant Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Lev M. Velus

Ph.D. (Eng.), Assistant Professor, Magnitogorsk, Russia.

Michail N. Tseitlin

D.Sc. (Eng.), Department of Physics, Ariel University, Ariel, Israel.

Oksana S. Logunova

D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Computer Science and Programming Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: logunova66@mail.ru.

The aim of the study is mathematical modeling of the process of nucleation of crystallites in liquid iron. To solve the problem, the authors used the stationarity principle and put forward a hypothesis that short-range order regions are formed in the volume of a liquid (metal melt) due to temperature fluctuations and the temperature of the short-range region is during the crystallization time the fluctuation of temperature near zero on the Kelvin scale. Studies were carried out for the substance in the liquid state, in particular for pig iron in the paramagnetic state at the melting temperature. In constructing a mathematical model of the process, analytical expressions are obtained for determining the average number of atoms in the short-range order region for crystallized cast iron. To obtain a regularity, the method of statistical physics, probability theory and mathematical statistics were used. The results of the computational experiment showed that the short-range order regions contain a sufficiently large number of atoms in order for the interaction with the pulsed magnetic field to lead to an increasing the number of crystal nuclei and a decrease in their dimensions. The results obtained are applicable for making

decisions on the conduct of technological measures aimed at obtaining a homogeneous structure of metals, in particular when designing installations for the action of a pulsed magnetic field on melts, particularly for ferrous and non-ferrous metallurgy.

Keywords: Mathematical model of fluctuations, crystallization of metallic melts, pulsed magnetic field, short-range order, the energy of thermal motion

REFERENCES

1. Yajchikov I.M., Devyatov D.Kh., Logunova O.S., Portnova I.V. Investigating the macrokinetics of the process of metal reduction from its oxides with the use of the pulsing plasma jets // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Chernaya Metallurgiya*. 2002. № 7. P. 17-19.
2. Kolokoltsev V.M., Vdovin K.N., Mayorova T.V., Ponomareva O.S. Ecological indicators in the system of non-financial reporting at industrial enterprises. *CIS Iron and Steel Review*. 2017. doi: 10.17580/cisr.2017.01.01
3. Vdovin K.N., Pivovarov K.G., Lisovskaya M.A. The Use of Thermal Analysis to Study the Structure and Properties of

- Roll Steels. *Metal Science and Heat Treatment*. 2014, no. 6, pp. 22-25.
4. Chukin M., Polyakova M., Gulín A., Nikitenko O. The possibility of manufacturing long-length metal products with ultra-fine grain structure by combination of strain effects. *Key Engineering Materials*. 2016, vol. 685, pp. 487-491. doi: 10.4028 / www.scientific.net / KEM.685.487.
5. Arkulis M.B., Velyus L.M., Savchenko Yu.I. Control of cast iron crystallization process by pulsed magnetic field. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы*. [Electrotechnical systems and complexes] 2016, no. 3, pp. 66-68. (In Russian)
6. Petrik M.V., Gorbátov O.I., Gornostyrev Yu.N. Role of Magnetism in the Formation of a Short Range Order in an Fe–Ga Alloy. *JETP Letters*. 2013, vol. 98, no. 12, pp. 809-812.
7. Petrik M.V., Gorbátov O.I. and Gornostyrev Yu.N. Effect of Magnetism on the Solution Energy of 3p(Al, Si) and 4p(Ga, Ge) Elements in Iron. *The Physics of Metals and Metallography*. 2013, vol. 114, no. 11, pp. 885-892.
8. Levich V.G. *Kurs teoreticheskoy fiziki* [The course of theoretical physics]. Moscow: Nauka, 1969, vol. 1, pp. 582-588. (In Russian)
9. Landau L.D., Lifshits E.M. *Statisticheskaya fizika* [Statistical physics]. Moscow: Gostehizdat, 1951, 372 p. (In Russian)
10. Yavorskiy B.M., Detlaf A.A. *Spravochnik po fizike* [Reference book on physics]. Moscow: Science, 1985. 512 p. (In Russian)
11. Chernikov D.G. Development of physical method of modifying cast aluminum alloys by pulsed magnetic processing. *Izvestiya OrelGTU. Seriya «Fundamentalnyie i prikladnyie problemyi tehniki i tehnologii»* [Series «Fundamental and practical problems of engineering and production»]. 2009. vol. 2-3/274(560), pp. 87-92. (In Russian)
12. Chernikov D.G., Gluschenkov V.A., Grechnikov F.V., Igoikin A.Yu., Nikitin V.I., Nikitin K.V. Pulsed magnetic processing of silumin AK9T. *Liteynoe proizvodstvo* [Foundry]. 2011, no. 9, pp. 8-11. (In Russian)
13. Levin M.N., Postnikov V.V., Matveev N.N. Influence of pulsed magnetic processing on crystallization of flexible polymers. *Vyisokomolekulyarnoe soedinenie A* [High-molecular compounds]. 2003, vol. 45, no. 2, pp. 217-223. (In Russian)
14. Postnikov V.V., Levin M.N., Matveev N.N., Skoridanov R.V., Kamalova N.S., Shamaev V.A. Influence of weak magnetic fields on modified wood. *Pisma v zhurnal tehnicheskoy fiziki* [Proceedings of technical physics]. 2005, vol. 31, iss. 9, pp. 14-19. (In Russian)
15. Alekseenko V.I. Influence of pulsed magnetic field on the structural states in oxide glass. *Zhurnal tehnicheskoy fiziki* [Proceedings of technical glass]. 1998, vol. 68, no. 10, pp. 50-54. (In Russian)
16. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Mathematical probability and mathematical statistics]. Moscow: High school, 1972. 360 p. (In Russian)

Математическая модель и результаты вычислительного эксперимента при исследовании влияния магнитного поля на образование областей ближнего порядка в металлических расплавах / Аркулис М.Б., Велюс Л.М., Цейтлин М.Н., Логунова О.С. // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 4(37). С. 61-66. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4\(37\)-61-66](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4(37)-61-66)

Arkulis M.B., Velus L.M., Tseitlin M.N., Logunova O.S. Mathematical Model and Results of a Numerical Swarm Experiment on the Effect of a Magnetic Field on the Formation of Short-range Order Regions in Metallic Melts. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 4(37), pp. 61-66. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4\(37\)-61-66](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4(37)-61-66)