

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 669.162.275.1:621.789

DOI: 10.18503/2311-8318-2016-3(32)-66-68

Аркулис М.Б., Велюс Л.М., Савченко Ю.И.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова»

К ВОПРОСУ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЧУГУНА ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Целью исследования является теоретическое обоснование возможности управления образованием микронеоднородностей с помощью импульсного магнитного поля. Исследования приведены для вещества в жидком состоянии, в частности для чугуна в парамагнитном состоянии при температуре плавления. В сообщении приведен аналитический вывод закономерности для определения количества атомов ближнего порядка в зависимости от напряженности магнитного поля и частоты следования импульсов. Для получения закономерности использованы метод статистической физики, теории вероятности и математической статистики. В работе представлен прогноз результатов влияния импульсного магнитного поля на диамагнитные материалы. Приведены результаты вычислительного эксперимента по определению размеров кристаллитов в зависимости от напряженности магнитного поля. Полученные закономерности рекомендуются для управления технологическими процессами при производстве чугуна.

Ключевые слова: кристаллизация, микроструктура, импульсное магнитное поле, ближний порядок, зародыш.

ВВЕДЕНИЕ

Снижение неоднородности в структуре металлических материалов является одной из актуальных проблем металлургической отрасли. Наряду с ультразвуковой обработкой, электромагнитным перемешиванием [1], способом порошковой металлургии, расплавы подвергают воздействию управляемого импульсного магнитного поля. Вопросами формирования структуры металла на микро- и макроуровнях проводились широким кругом исследователей. Результаты исследований и методы обработки различных материалов импульсного магнитного поля представлены в ряде работ [2-6]. В работах [2, 3] установлено, что при определенных параметрах магнитно-импульсной обработки (энергия разряда, количество импульсов) улучшаются литейные свойства сплава, происходят благоприятные изменения в структуре и, как следствие, улучшаются механические свойства сплава в литом состоянии, которые впоследствии оказывают влияние на качество полуфабриката и готовой металлургической продукции [7, 8]. В работе [4] установлено необратимое изменение температур кристаллизации $T_{кр}$ и плавления $T_{пл}$ полимеров при их кратковременной обработке импульсным магнитным полем. Эксперименты с образцами прессованной древесины показали существенное увеличение их торцевой твердости после обработки [5]. В [6] исследовались оптимальные условия воздействия импульсного магнитного поля на стекло. Осуществление управления процессом кристаллизации чугуна позволяет снизить неоднородность в структуре металлических расплавов и требует выявления возможных управляющих воздействий.

МЕТОДИКА

В работе жидкие металлы и сплавы считаются микронеоднородными по структуре и составу, отличаются высокотермической устойчивостью, наследственной от твердого состояния структурой ближнего порядка [9].

Впервые на близость строения и свойств жидких и твердых металлов указал Я.И. Френкель [10]. Согласно рекомендациям [8, 9] расплав рассматривается как жидкость с микронеоднородными образованиями, чувствительными к внешнему управляющему воздействию.

Чугун в жидком парамагнитном состоянии является классической системой, к которой применима статистика Максвелла-Больцмана [11]. Обозначим N_0 число зародышей кристаллов в расплаве в отсутствие магнитного поля, а N – число зародышей при наличии импульсного магнитного поля с частотой следования приблизительно 1 Гц. Тогда

$$\frac{N}{N_0} = \exp \left\{ \frac{-\Delta W_m}{kT} \right\}, \quad (1)$$

где $-\Delta W_m$ – добавочная энергия магнитного дипольного момента p_m в магнитном поле с индукцией B ; $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура системы.

Добавочная энергия одного атома определяется

$$-\Delta W_m = p_{mz} B, \quad (2)$$

где p_{mz} – проекция магнитного момента атома железа на направление вектора индукции B .

Величина $-\Delta W_m$ положительна, так как железо при температуре плавления является парамагнитным [12], и магнитный дипольный момент одного атома железа равен

$$p_{mz} = n \cdot \mu_B, \quad (3)$$

где $n=2,218$ – число магнетонов Бора на один атом железа [12]:

$$\mu_B = e\hbar / (2m_e) = 9,3 \cdot 10^{-24} \text{ А} \cdot \text{м}^2.$$

Величина магнитного дипольного момента равна

$$\begin{aligned} p_{mz} &= 2,218 \cdot \mu_B = 2,218 \cdot 9,3 \cdot 10^{-24} = \\ &= 2,06 \cdot 10^{-23} \text{ А} \cdot \text{м}^2. \end{aligned}$$

За время кристаллизации $\tau_{кр}$ расплав воспринимает импульсы длительностью τ_1 .

Обозначим

$$Z = \tau_{кр} / \tau_1$$

число импульсов магнитного поля, воспринимаемое расплавом за время кристаллизации $\tau_{кр}$.

Тогда

$$-\Delta W_m = Z \cdot p_{mz} B = Z \cdot 2,06 \cdot 10^{-23} B. \quad (4)$$

Переходя к напряженности H , [А/м], в (4) получаем

$$\begin{aligned} -\Delta W_m &= Z \cdot p_{mz} \mu_0 \cdot H = \\ &= Z \cdot 2,06 \cdot 10^{-23} 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot H \approx Z \cdot 2,6 \cdot 10^{-29} H. \end{aligned} \quad (5)$$

Подстановка (5) в (1) дает

$$\begin{aligned} \frac{N}{N_0} &= \exp \left\{ \frac{Z \cdot 2,6 \cdot 10^{-29} H}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1,5 \cdot 10^3} \right\} \cong \\ &\cong \exp \{ Z \cdot 1,25 \cdot 10^{-9} H \}. \end{aligned} \quad (6)$$

Из (6) видно, что $(N/N_0) > 1$; $N > N_0$,

Поскольку $N \cdot d^3 = \text{const}$, то увеличение числа зародышей, с учетом (6), приводит к уменьшению размеров кристаллитов d в соотношении

$$\begin{aligned} \frac{d_0}{d} &= \sqrt[3]{\frac{N}{N_0}} = \exp \left\{ \frac{Z \cdot 1,25 \cdot 10^{-9} H}{3} \right\} = \\ &= e^{Z \cdot 0,417 \cdot 10^{-9} H}. \end{aligned}$$

Если учесть, что жидкий расплав есть система областей ближнего порядка [6], содержащих v атомов, то

$$d_0/d = e^{v \cdot Z \cdot 0,417 \cdot 10^{-9} H}. \quad (7)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

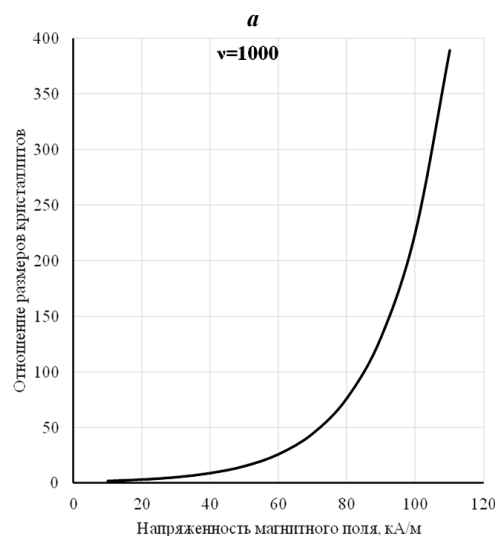
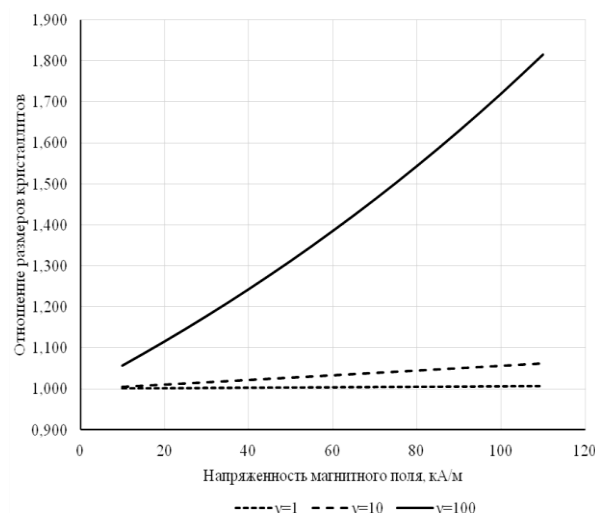
Приведем графики зависимостей расчетов по (7) для $Z=130$ и различных v , которые могут выступать в качестве управляющего воздействия (см. **рисунок**).

Анализ полученных зависимостей показывает, что импульсное магнитное поле при определенных условиях оказывает существенное влияние на уменьшение размеров кристаллитов, что позволяет выполнить эффективное управление. Также следует отметить, что экспериментальное определение величины d_0/d позволяет определить количество атомов в области ближнего порядка. В нашем случае

$$v = \frac{1}{Z \cdot H \cdot 0,417 \cdot 10^{-9}} \ln \frac{d_0}{d}. \quad (8)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При рассмотрении расплава как жидкости с микронезоднородными образованиями с точки зрения статистических закономерностей, используя полученные зависимости (7) и (8), возможно подобрать режим импульсной магнитной обработки металла для получения заданной неоднородности чугуна.



Относительное уменьшение размеров кристаллитов с ростом величины напряженности магнитного поля:
а – при малых значениях v ; б – при больших значениях v

2. Выдвинута научно обоснованная гипотеза о том, что если подвергнуть диамагнитное вещество обработке импульсным магнитным полем, то будет наблюдаться обратный эффект. В случае диамагнетика добавочная энергия магнитного дипольного момента p_m имеет положительное значение и, как следствие, отношение N/N_0 примет значение больше единицы, т.е. скорость роста кристалла будет опережать скорость образования зародышей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Непрерывная разливка стали. Расчеты медных кристаллизаторов / И.М. Ячиков, К.Н. Вдовин, В.В.Точилкин и др. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2014. 192 с.
2. Черников Д.Г. Разработка физического способа модифицирования литейных алюминиевых сплавов магнитно-импульсной обработкой // Известия ОрелГТУ. Серия: Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2009. № 2-3/274(560). С.87-92.
3. О магнитно-импульсной обработке расплава силумина АК9Т/ В.А. Глушечков, Ф.В. Гречников, А.Ю. Иголкин и др. //Литейное производство. 2011. №9. С.8-11.
4. Левин М.Н., Постников В.В., Матвеев Н.Н. Влияние импульсной магнитной обработки на кристаллизацию гибкоцепных полимеров // Высокомолекулярные соедине-

- ния. А. 2003. Т.45. №2. С.217-223.
5. Воздействие слабых импульсных магнитных полей на модифицированную древесину / В.В. Постников, М.Н. Левин, Н.Н. Матвеев и др. // Письма в журнал технической физики. 2005. Т.31. Вып.9. С.14-19.
 6. Алексеев В.И. Возможности влияния импульсного магнитного поля на структурные состояния в оксидном стекле // Журнал технической физики. 1998. Т.68. №10. С.50-54.
 7. Стратегия постановки задачи многокритериальной оптимизации состава шихтовых материалов для электродуговой сталеплавильной печи / О.С. Логунова, Е.Г. Филиппов, И.В. Павлов, В.В. Павлов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2013. №1. С.66-70.

8. Логунова О.С., Парсункин Б.Н., Суспицын В.Г. Автоматизированная оценка качества непрерывнолитой заготовки // Сталь. 2004. №12. С.101-104.
9. Ершов Г.С., Поздняк А.П. Микрогетерогенность металлов и сплавов // Металлургия. 1985. 214 с.
10. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкости. Л.: Наука, 1975. 592 с.
11. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: учебник. М.: Высш. шк., 1987. 360 с.
12. Иродов И.Е. Электродинамика. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. 352 с.
13. Бозорт Р. Ферромагнетизм. М.: Изд-во Иностранная литература, 1956. 784 с.

Поступила в редакцию после доработки 11 мая 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

THE ISSUE OF CONTROL OF THE PROCESS OF IRON CRYSTALLIZATION BY PULSED MAGNETIC FIELD

Mikhail B. Arkulis

Ph.D. (Pedagogics), Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
E-mail: arkulis78@mail.ru.

Lev M. Velyus

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

Yuriy I. Savchenko

Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: sav@magtu.ru.

The aim of this study is to provide the theoretical basis of the control capabilities of microinhomogeneity formation using a pulse magnetic field. The results are given for the substance in the liquid state, in particular for iron in the paramagnetic state at the melting temperature. The study presents an analytical derivation of law for determining the number of short-range order atoms depending on magnetic field strength and pulse repetition rate. To obtain the law, the methods of statistical physics, probability theory and mathematical statistics were used. The paper presents the results of the forecast of the effect of pulsed magnetic fields on diamagnetic materials. The results of computational experiments aimed at determining the crystallite size depending on the intensity of the magnetic field are shown. These laws are recommended for control of technological processes in production of iron.

Keywords: Crystallization, microstructure, magnetic field strength, pulse repetition frequency, short-range order, nucleation center.

REFERENCES

1. Yachikov I.M., Vdovin K.N., Tochilkin V.V. et.al. *Nepreryivnaya razlivka stali. Raschetyi mednykh kristallizatorov* [Continuous Casting of Steel. Design of Copper Moulds]. Magnitogorsk, Publishing center of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, 192 p.
2. Chernikov D.G. Development of Physical Method of cast Aluminum Alloys Modification by Magnetic-impulse Processing. *Izvestiya OrelGTU. Seriya: Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Izvestiya OrelGTU. Series: Fundamental and applied problems of engineering and technology], 2009, no.2-3/274(560), pp.87-92. (In Russian).
3. Gluschenkov V.A., Grechnikov F.V., Igolkin A.Yu. et.al. Magnetic-impulse Processing of AK9T Silumin Melt. *Litynoe proizvodstvo* [Foundry industry], 2011, no.9, pp.8-

11. (In Russian).
4. Levin M.N., Postnikov V.V., Matveev N.N. Influence of Magnetic-impulse Processing on Crystallization of Flexible Polymers. *Vysokomolekulyarnye soedineniya* [High-molecular compounds], 2003, vol.45, no.2, pp.217-223. (In Russian).
5. Postnikov V.V., Levin M.N., Matveev N.N. et.al. Influence of Weak Impulse Magnetic Fields of Modified Wood. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Articles from the journal of physics for engineering], 2005, vol.31. is.9, pp.14-19. (In Russian).
6. Alekseenko V.I. Influence of Impulse Magnetic Field on Structural State in Oxide Glass. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of physics for engineering], 1998, vol.68, no.10, pp.50-54. (In Russian).
7. Logunova O.S., Filippov E.G., Pavlov I.V., Pavlov V.V. Strategy of Task Setting of Multicriteria Optimization Charge Composition for Electric Arc Steel-making Furnace. *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of universities. Ferrous metallurgy], 2013, no.1, pp.66-70. (In Russian).
8. Logunova O.S., Parsunkin B.N., Suspitsyn V.G. Automatic Assessment of Quality of Continuous Cast Billet. *Stal'* [Steel], 2004, no.12, pp.101-104. (In Russian).
9. Ershov G.S., Pozdnyak A.P. Microinhomogeneity of Metals and Alloys. *Metallurgiya* [Metallurgy], 1985, 214 p.
10. Frenkel Ya.I. *Kineticheskaya teoriya zhidkosti* [Kinetic Theory of Liquid]. Leningrad, Publishing center «Nauka», 1975. 592 p.
11. Matveev, A.N. *Molekulyarnaya fizika* [Molecular Physics. Textbook for technical universities]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987. 360 p.
12. Irodov I.E. *Elektromagnetizm. Osnovnyye zakonyi* [Electromagnetism. Basic Laws]. Moscow, Laboratoriya bazovykh znaniy Publ., 2001. 352 p.
13. Bozort R. *Ferromagnetizm* [Ferromagnetism]. Moscow, Inostrannaya literature Publ., 1956. 784 p.