

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №5 (155). С.3-8.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №5 (155). P.3-8.

Научная статья

УДК 621.74.628:669.131.6

doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-8

Механизм влияния электрического поля на процесс модифицирования серого чугуна

Георгий Николаевич Миненко, к.т.н.

Ресурсный центр отраслевого машиностроения Московской области,

Люберцы, Россия

minenko1946@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-2839-2045>

***Аннотация.** Представлена схема экспериментальной установки для измерения электрического сопротивления расплава серого чугуна, в которой использован измерительный прибор на основе двойного мостового устройства Томпсона. Показано, что величина удельного электрического сопротивления серого чугуна изменяется в зависимости от марки применяемого модификатора. Приведены опытные данные по отличию величин удельного электрического сопротивления для различных модификаторов серого чугуна. Также даны изменения значений электросопротивления под влиянием обработки электрическим полем расплава модифицированного чугуна. Сопоставление величин прочности серого чугуна с его значениями удельного электрического сопротивления расплава чугуна после воздействия электрического поля показали их одновременное изменение. Показано падение значений удельного электросопротивления жидкого чугуна от воздействия электрического поля, и оно соответствует приращению прочности модифицированного серого чугуна. Эффективность воздействия электрического поля на процесс модифицирования чугуна определяется термической ионизацией химических элементов входящих в состав модификатора. Показано максимальное увеличение этих параметров после обработки электрическим полем при использовании модификатора ФС75. Описан механизм влияния электрического поля на процесс кристаллизации чугуна для процесса модифицирования ФС75, содержащего в своём составе 75 % кремния. Приведена зависимость эффективности обработки электрическим полем от состава модификатора для серого чугуна. Описана физическая модель воздействия электрического поля на процесс модифицирования серого чугуна. Указана возможность посредством обработки электрическим полем влиять на гидродинамическую обстановку в расплаве серого чугуна и изменять скорость растворения частиц модификаторов.*

Ключевые слова: модифицирование серого чугуна, процесс кристаллизации, удельное электрическое сопротивление, обработка электрическим полем, прочность серого чугуна, механизм влияния электрического поля

Для цитирования: Миненко Г.Н. Механизм влияния электрического поля на процесс модифицирования серого чугуна // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 5 (155). С. 3–8. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-8

Mechanism of the electric field effect on the process of grey cast iron inoculation

Georgy N. Minenko, Ph.D. Eng.
Resource Center for Industrial Engineering of the Moscow region,
Lyubertsy, Russia
minenko1946@mail.ru

Abstract. A diagram of an experimental installation for measuring the electrical resistance of a gray cast iron melt is presented, where a gauge based on a Kelvin double bridge is used. It is shown that the value of the specific electrical resistance of gray cast iron varies depending on the type of conditioning agent. Experimental data on the difference in specific resistivity values for various gray cast iron nucleating agents are presented. Changes in the values of electrical resistance under the influence of electric field treatment of inoculated cast iron melt are also given. Comparison of the strength values of gray cast iron with its values of the electrical resistivity of the cast iron melt after the electrical field exposure showed their simultaneous change. The decrease in the values of the electrical resistance of hot iron due to the electric field exposure is shown and it corresponds to an increment in the strength of inoculated cast iron. The effectiveness of the electric field exposure on the process of inoculation is determined by thermal ionization of the chemical elements included in the conditioning agent. The maximum increase of these parameters after electric field exposure when using FS75 nucleating agent is shown. The mechanism of the influence of an electric field on the cast iron solidification for the inoculation process of FS75, containing 75 % silicon in its composition, is described. The dependence of the efficiency of electric field exposure on the composition of the nucleating agent for gray cast iron is shown. A physical model of the effect of an electric field exposure on the process of cast iron inoculation is found. The possibility of influencing the hydrodynamic situation in the melt of gray cast iron and changing the rate of dissolution of nucleating agent particles by means of electric field exposure is given.

Keywords: cast iron inoculation, process of solidification, electrical resistance, electric field exposure, gray cast iron strength, mechanism of electric field effect.

For citation: Minenko G.N. Mechanism of the electric field effect on the process of grey cast iron inoculation / Science intensive technology in mechanical engineering. 2024. № 5 (155). P. 3–8. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-8

Одним из перспективных способов повышения механических свойств литейных сплавов является воздействие электрического поля на металлический расплав [1 – 3]. Также своё применение этот способ нашёл при модифицировании сплавов [4, 5]. Однако для оптимизации использования этого метода в литейном производстве следует, основываясь на физической модели, определить механизм влияния электрического поля с учётом специфики протекания данного способа воздействия на расплав в условиях процесса модифицирования серого чугуна.

Для определения особенностей процесса воздействия электрического поля на процесс модифицирования серого чугуна

была использована экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 1.

В состав данной установки входят: 1 – огнеупорная емкость объемом 50 кг; 2 – печь сопротивления для подогрева расплава серого чугуна; 3 – измерительные электроды измерительной схемы (ИС) соединённых с двойной мостовой схемой Томпсона [6]; 4 – электроды подачи постоянного напряжения со звукового генератора ЗГ-17 (ИПН) и напряжения поля обработки расплава (ИН); 5 – устройство подъема и погружения измерительной ячейки в расплав серого чугуна; М – приспособление ввода модификатора в расплав чугуна.

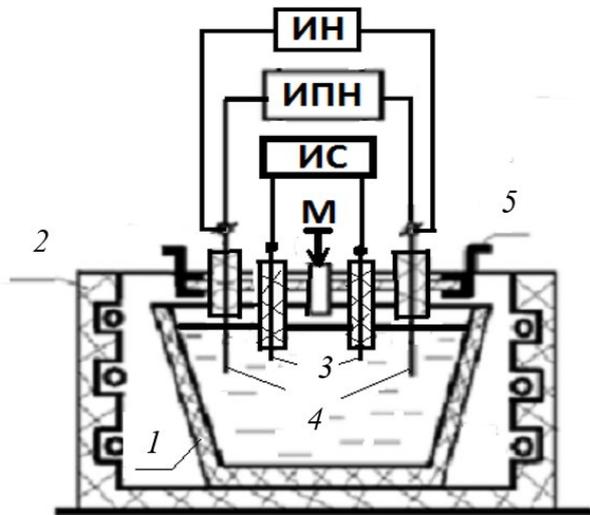


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения влияния электрического поля на процесс модифицирования серого чугуна

Fig. 1. Scheme of an experimental installation for determining the effect of the electric field effect on the process of grey cast iron inoculation

В электрической схеме предусмотрено автоматическое отключение источника напряжения (ИН) при работе звукового генератора (ИПН), что исключает одновременное подключение к расплаву чугуна ИН и ИПН через электроды 4 (см. рис. 1). Температура ввода модификатора, которая составляла 1380 °С, измерялась термопарой ВР-5/10.

Результаты определения величин удельного электросопротивления R расплава модифицированного серого чугуна показали их существенные изменения. Так после процесса модифицирования чугуна ФС75 (рис. 2, поз. 1) и сразу после обработки электрическим полем в процессе модифицирования (рис. 2, поз. 2) показали, в среднем, разность в 52 мкОм·см.

Различия средних величин R для процесса модифицирования Селикомишметаллом -СММ (рис. 2, поз. 3 и поз. 4) составили 37 мкОм·см и при модифицировании СК25 (рис. 2, поз. 5 и поз. 6) 41 мкОм·см. Можно предположить, что наименьшую величину R расплав обработанного, модифицированного

ФС75 серого чугуна (см. рис. 2) имеет за счёт увеличения количества токоносителей (электронов и ионов) после растворения частиц модификатора и образованием большого числа центров кристаллизации в расплаве чугуна.

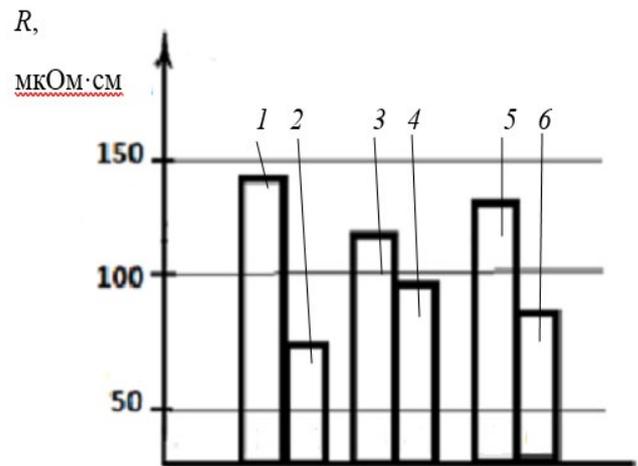


Рис. 2. Изменения величины удельного электрического сопротивления R расплава модифицированного серого чугуна после обработки электрическим полем

Fig. 2. Change in the value of the electrical resistance R of the melt of inoculated cast iron after treatment with an electric field exposure

Опытные данные по определению прочностных свойств модифицированного серого чугуна марки ФС75 (75 % Si; 1 % Ca; 2 % Al), СММ (55 % Si; 3 % Ca; 5 % Al) и СК25 (45 % Si; 30 % Ca; 1 % Al) с вводом модификатора 0,5 % от массы сплава [7] показали, что для всех процессов модифицирования (рис. 3) происходит существенное увеличение прочностных свойств серого чугуна. На рис. 3 нечётными цифрами обозначены результаты воздействия электрического поля на процессы модифицирования чугуна ФС75, СММ и СК25. Над столбцами диаграммы с чётными цифрами приведены данные для этих процессов модифицирования серого чугуна без обработки электрическим полем.

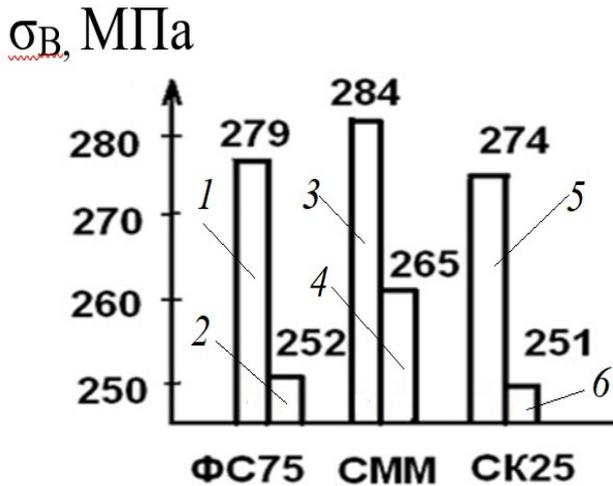


Рис. 3. Изменение прочностных свойств модифицированного серого чугуна под влиянием электрического поля

Fig. 3. Change in the strength properties of inoculated cast iron under electric field effect

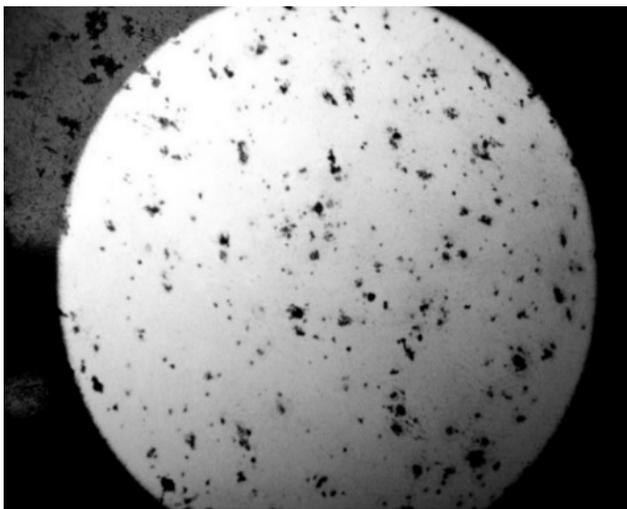


Рис. 4. Образец исходного модифицированного FC75 серого чугуна (не травлено, ×100)

Fig. 4. Sample of the original inoculated FS75 cast iron (not etched, × 100)

Металлографические исследования выявили изменение количества включений графита в структуре серого чугуна под влиянием электрического поля, так на рис. 4 представлена структура чугуна после модифицирования после FC75.

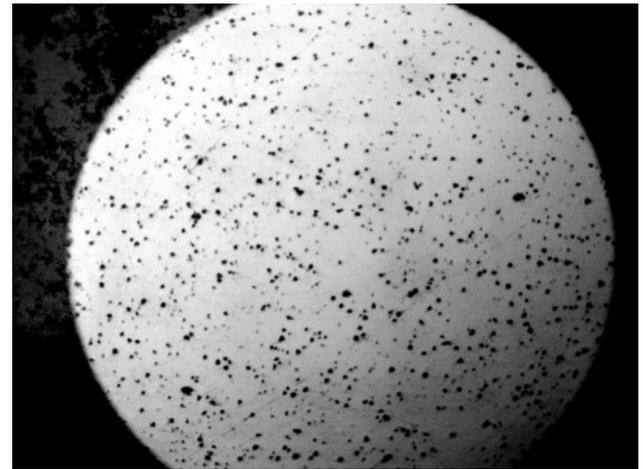


Рис. 5. Образец обработанного электрическим полем модифицированного FC75 серого чугуна (не травлено, ×100)

Fig. 5. Sample of inoculated FS75 cast iron treated with an electric field (not etched, ×100)

На рис. 5 показана структура чугуна после модифицирования FC75 с обработкой электрическим полем. Из сопоставления данных структур следует, что воздействие электрического поля существенно влияет на количество включений графита и делает структуру обработанного модифицированного более упрочнённой прочной по сравнению с исходным модифицированным чугуном. Рост прочностных свойств обработанного сплава вызван позитивными изменениями в структуре чугуна за счёт более дисперсных графитовых включений, которые в меньшей степени подрезают металлическую основу сплава. Это объясняется тем, что при вводе частиц модификатора (FC75 с 75 % Si) в металлический расплав происходит их растворение с нарушением ковалентных связей в Si и возникает увеличение количества свободных токоносителей [8, 9]. Наложение на расплав электрического поля приводит к ускорению движения этих токоносителей, которые передают свою кинетическую энергию центрам кристаллизации сплава увеличивая их энергию и тем самым снижают критический размер зародышей кристаллов [10, 11]. Такие условия роста кристаллов вызывают увеличение количества кристаллов

графита в единице объёма обработанного серого чугуна, что упрочняет его структуру и повышает прочностные свойства.

Наибольшее повышение прочностных свойств и приращение величины электросопротивления расплава чугуна наблюдается после обработки электрическим полем при использовании ФС75 (см. рис. 2 и рис. 3). Можно предположить некоторое снижение прочностных свойств чугуна при вводе СК25 и СММ, по сравнению с ФС75, происходит за счёт меньшей степени термической ионизации химических элементов, входящих в состав этих модификаторов [8, 12]. Это уменьшает количество свободных токоносителей в расплаве и снижает эффективность воздействия электрического поля на процесс кристаллизации серого чугуна.

Также в межэлектродном пространстве под влиянием электрического поля возникают термоэлектрические явления и выделяется джоулево тепло, которое повышает интенсивность конвективных потоков в металлическом расплаве и изменяет гидродинамическую обстановку [13, 14]. Это позитивно влияет на скорость растворения частиц модификаторов в жидком чугуне и повышает степень усвоения модификатора металлическим расплавом, что воздействует на рост эффективности влияния модификатора на структуру сплава [15, 16].

Заключение

Таким образом, опытные данные по определению удельного электросопротивления жидкого чугуна выявили зависимость их величин от химсостава используемых модификаторов и влияние на них электрофизического воздействия. Результаты по измерению прочности модифицированного серого чугуна показали позитивное влияния обработки расплава чугуна электрическим полем. Падение значений удельного электросопротивления после воздействия электрическим полем на жидкий чугун соответствующим приращению прочности модифицированного серого

чугуна. Воздействие электрического поля на процесс модифицирования чугуна определяется термической ионизацией химических элементов входящих в состав модификатора. Обработка электрическим полем влияет на гидродинамическую обстановку в расплаве серого чугуна изменяющую скорость растворения частиц модификаторов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Вертман А.А., Самарин А.М.** Свойства расплавов железа. М.: «Наука», 1969. 280 с.
2. **Чернышов И.А.** Электромагнитное воздействие на металлические расплавы. М.: Metallurgizdat, 1963. 246 с.
3. **Верте Л.А.** Электромагнитная разливка и обработка жидкого металла. Л., Metallurgiya, 1967. 206 с.
4. **Миненко Г.Н.** Воздействие физических полей на процессы внепечной обработки литейных сплавов. Учебное пособие. М.: Издательство «Спутник +», 2012. 64 с.
5. **Миненко Г.Н.** О воздействии обработки электропотоком на процесс модифицирования Fe-C сплавов // Литейное производство. 2011. № 5. С. 6–8.
6. **Филиппов С.И., Арсентьев П.П., Яковлев В.В., Крашенинников М.Г.** Физико-химические методы исследования металлургических процессов М.: Metallurgiya, 1968, 551 с.
7. **Справочник по чугунному литью /** Под ред. Н.Г. Гиршовича. Изд. 3-е. Л.: Машиностроение, 1978. 758 с.
8. **Белашенко Д.К.** Явления переноса в жидких металлах и полупроводниках. М.: Атомиздат, 1970. 252 с.
9. **Регель А.Р., Глазов В.М.** Физические свойства электронных расплавов. М. «Наука», 1980. 296 с.
10. **Куманин И.Б.** Вопросы теории литейных процессов. Формирование отливок в процессе затвердевания и охлаждения сплава. М., Машиностроение, 1976. 216 с.
11. **Ершов Г.С., Черняков В.А.** Строение и свойства жидких и твёрдых металлов. М.: Metallurgiya. 1978. 248 с.
12. **Жуховицкий А.А., Белашенко Д.К., Бокштейн Б.С., Григорян В.А., Григорьев Г.А., Гугля В.Г.** Физико-химические основы металлургических процессов. М.: Metallurgiya, 1973. 392 с.
13. **Гельфгат Г.М., Лиелаусис О.А., Щербинин Э.В.** Жидкий металл под воздействием электромагнитных сил. Рига: «Зинанте», 1976. 248 с.
14. **Кирко И.М.** Жидкий металл в электромагнитном поле. М.: Энергия, 1964. 237 с.

15. Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А. Краткий курс физической химии. М.: Металлургия, 1979. 368 с.

16. Миненко Г.Н., Головоких А.С. Особенности процесса воздействия электрического тока на металлический расплав // Литейщик России. 2011. № 7. С. 29–30.

REFERENCES

1. Vertman A.A., Samarin A.M. Properties of iron melts. Moscow.: Nauka, 1969, 280 p.

2. Chernyshov I.A. Electromagnetic effect on metal melts. Moscow: Metallurgizdat, 1963. 246 p.

3. Verte L.A. Electromagnetic casting and treatment of liquid metal. Leningrad: Metalurgia, 1967, 206 p.

4. Minenko G.N. The effect of physical fields on the processes of secondary metallurgy process of casting alloys. Textbook. Moscow: Publishing house «Sputnik +», 2012. 64 p.

5. Minenko G.N. Influence of processing of melt by electric field on processes of modifying of Fe-C alloys // Foundry practices, 2011, no. 5, pp. 6–8.

6. Filippov S.I., Arsentiev P.P., Yakovlev V.V., Krashennnikov M.G. Physico-chemical methods of research of metallurgical processes. Moscow: Metallurgia, 1968, 551 p.

7. Iron Casting Guide / edited by N.G. Girshovich, 3rd edition. Leningrad: Mashinostroenie, 1978, 758 p.

8. Belashchenko D.K. Transfer phenomena in liquid metals and semiconductors. Moscow: Atomizdat, 1970, 252 p.

9. Regel A.R., Glazov V.M. Physical properties of electronic melts. Moscow: Nauka, 1980, 296 p.

10. Kumanin I.B. Issues of theory of casting processes the formation of castings in the process of solidification and cooling of the alloy. Moscow Mashinostroenie, 1976, 216 p.

11. Ershov G.S., Chernyakov V.A. Structure and properties of liquid and solid metals. Moscow: Metallurgia, 1978, 248 p.

12. Zhukhovitsky A.A., Belashchenko D.K., Bokshtein B.S., Grigoryan V.A., Grigoriev G.A., Guglya V.G. Physical and chemical bases of metallurgical processes. Moscow: Metallurgia, 1973, 392 p.

13. Gelfgat G.M., Lielausis O.A., Shcherbinin E.V. Liquid metal under the influence of electromagnetic forces. Riga: Zinante, 1976, 248 p.

14. Kirko I.M. Liquid metal in an electromagnetic field. Moscow: Energiya, 1964, 237 p.

15. Zhukhovitsky A.A., Shvartsman L.A. A short course in physical chemistry. Moscow: Metallurgia, 1979, 368 p.

16. Minenko G.N., Golovkin A.S. Characteristics of the electric current action on a metal melt // Smelter of Russia, 2011, no. 7, pp. 29–30.

Статья поступила в редакцию 21.03.2024; одобрена после рецензирования 11.03.2024; принята к публикации 20.03.2024.

The article was submitted 21.03.2024; approved after reviewing 11.03.2024; assepted for publication 20.03.2024.

