



УДК 621.744

Поступила 18.11.2014

МЕХАНИЗМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ПРОЦЕССЫ МОДИФИЦИРОВАНИЯ Fe–C–СПЛАВОВ

MECHANISM OF IMPACT OF ELECTRIC FIELDS ON PROCESSES OF MODIFYING OF Fe–C ALLOYS

Г. Н. МИНЕНКО, Ресурсный центр отраслевого машиностроения Московской области, Россия
G. MINENKO, Resource center of mechanical engineering of the Moscow region, Russia

Изложено описание физической модели процесса воздействия электрического поля на процесс модифицирования сплава. Рассмотрены основные факторы процесса обработки электрическим током, возникающего от наложения на металлический расплав электрического поля. Показан механизм влияния энергии электрического поля и силового взаимодействия свободных токоносителей с центрами кристаллизации сплава. Предложена периодизация стадий модифицирования серого чугуна. Даны результаты воздействия электрического поля на механические свойства чугунов в зависимости от содержания кремния в модификаторе. Показано влияние термовременной обработки расплава модифицированной стали на ее прочностные свойства.

The description of physical model of process of impact of electric field on process of modifying of an alloy is stated. Major factors of the processing electric current arising from imposing on metal fusion of electric field are considered. The mechanism of influence of energy of electric field and power interaction of free current carrier with the centers of crystallization of an alloy is shown. The periodicity of stages of modifying of gray cast iron is offered. Results of impact of electric field on mechanical properties of cast iron depending on the content of silicon in the modifier are yielded. Influence of thermotemporary processing of fusion of the modified steel on its strength properties is shown.

Ключевые слова. *Обработка электрическим полем, процесс модифицирования серого чугуна, растворение частиц модификатора, поток токоносителей, активизация центров кристаллизации, стадии воздействия на процесс модифицирования, эффект воздействия, изотермическая выдержка расплава стали, повышение прочностных свойств.*

Keywords. *Processing by electric field, process of modifying of gray cast iron, dissolution of particles of the modifier, a stream of current carrier, activation of the centers of crystallization, a stages of impact on modifying process, effect of influence, isothermal soaking of steel fusion, increase of strength properties.*

Воздействия физических полей на металлические расплавы являются сложными, многофакторными процессами [1], применение которых для получения высококачественных, модифицированных сплавов имеют свои особенности. Для успешного практического использования электрических полей в процессе модифицирования Fe–C–сплавов необходимо учитывать физические явления, возникающие в модифицируемом сплаве.

Влияние энергии электрического поля на металлический расплав приводит к ускорению движения заряженных частиц (токоносителей) в жидком чугуне и выделению джоулева тепла, которое интенсифицирует конвективные потоки в жидком чугуне. Под их воздействием увеличивается скорость растворения частиц модификатора и повышается степень усвоения модификатора серым чугуном [2], что положительно сказывается на его структуре и величине прочностных свойств. Также, по нашему мнению, следует отметить позитивное влияние на количество токоносителей в жидком чугуне процесса ионизации химических элементов модификатора, растворившихся в сплаве. Можно предположить, что энергия возросшего числа токоносителей делает возможным дополнительное вовлечение в процесс образования дозародышей кристаллов графита на неметаллических включениях, находящихся в расплаве чугуна. Эксперименты по фиксации жидкого состояния расплава чугуна индукционной плавки показали, что у исходного модифицированного ферросилицием марки ФС75 серого чугуна (рис. 1) количество включений свободного графита значительно меньше, чем число включений графита в обработанном электрическим полем модифицированном чугуне (рис. 2).

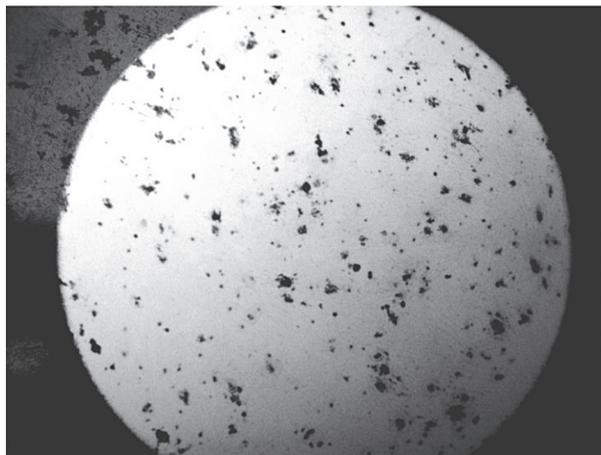


Рис. 1. Образец исходного модифицированного серого чугуна (не травлено, x100)

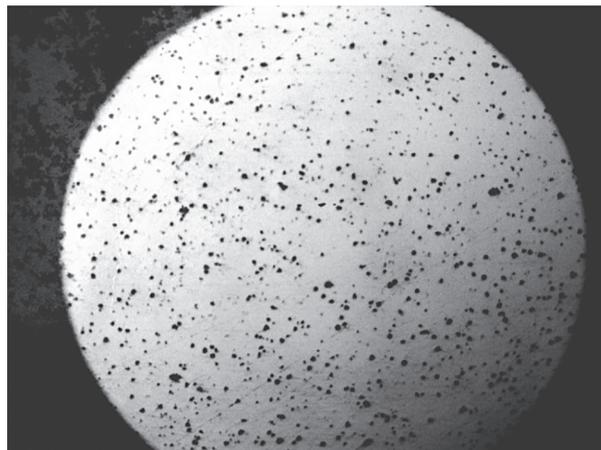


Рис. 2. Образец обработанного электрическим полем модифицированного серого чугуна (не травлено, x100)

Из результатов экспериментов можно предположить, что воздействие электрического поля на процесс модифицирования серого чугуна имеет следующие стадии:

1. Интенсификация конвективных потоков в расплаве чугуна за счет выделения джоулева тепла в локальных объемах жидкого чугуна.

2. Ускорение растворения вещества модификатора и ионизация атомов химических элементов, входящих в его состав.

3. Воздействие потока токоносителей на имеющиеся в жидком чугуне центры кристаллизации и процесс образования дозародышей кристаллов графита.

4. Рост количества центров кристаллизации в единице объема расплава и их позитивное влияние на структурообразование в сплаве.

Следует отметить, что первая стадия воздействия электрического поля на процесс модифицирования чугуна положительно влияет на последующие стадии этого процесса. Так, ускорение растворения и ионизация способствуют увеличению числа токоносителей и повышает электропроводность расплава. При этом происходит рост количества джоулева тепла в локальных объемах жидкого чугуна, обогащенного кремнием, что также ускоряет растворение в чугуне частиц модификатора. Кроме того, ускоренные электрическим полем токоносители осуществляют силовое воздействие на имеющиеся и образующиеся центры кристаллизации чугуна, передавая им свою кинетическую энергию, и могут повышать свободную энергию в локальном объеме расплава вокруг центра кристаллизации [3].

Для подтверждения эффективности влияния обработки электрическим полем в процессе модифицирования в зависимости от процентного содержания кремния в модификаторе, как основного химического элемента, повышающего число токоносителя в жидком чугуне, были проведены опыты с использованием следующих кремнийсодержащих модификаторов: ферросилиций ФС75 (76,10% Si); силикокальций СК25 (59,40% Si); силикомишметалл СММ (42,80% Si); ферроцерий ФЦ (0,20% Si). Необработанный модифицированный и обработанный электрическим полем чугуны индукционной плавки при температуре 1390 ± 10 °С заливали в литейные формы, в которых получали образцы для механических испытаний. Как показали результаты экспериментов (рис. 3), под влиянием электрического поля происходит повышение прочностных свойств модифицированного серого чугуна (столбцы слева для всех использованных модификаторов), при этом приращения данных свойств чугуна снижаются с уменьшением количества кремния в модификаторе. При минимуме содержания кремния в модификаторе (ФЦ) разность прочностных свойств обработанного модифицированного чугуна (столбец слева) и свойств необработанного модифицированного чугуна (столбец справа) минимальна. Такое изменение прочностных свойств модифицированного серого чугуна свидетельствует о существенном влиянии кремния на приращение прочностных свойств при обработке чугуна в процессе модифицирования электрическим полем.

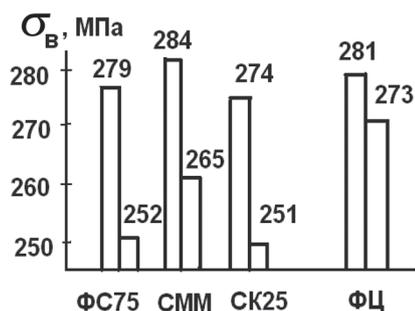


Рис. 3. Изменение прочностных свойств модифицированного серого чугуна под влиянием электрического поля

На состояние зародышевой фазы кристаллов сплава существенно влияет термовременная обработка металлического расплава. Для определения влияния изотермической выдержки расплава стали на воздействие электрического поля в процессе модифицирования стали были проведены эксперименты с использованием литой стали марки 40Л. В качестве модификатора применяли ферротитан марки ФТи20 (процент ввода в расплав стали равен 0,50 от массы сплава). В опытах использовали две индукционные печи ИСТ-016, в одной из которых доводили расплав стали до температуры модифицирования (1540 ± 10 °С). Затем сталь переливали с помощью 40-килограммового ковша, в котором производили модифицирование стали, в другую разогретую промывочной плавкой печь, где и проводили выдержку расплава стали во времени.

Результаты экспериментов указали на значительное увеличение прочностных свойств стали после обработки электрическим полем в процессе модифицирования литой стали, но в процессе выдержки расплава происходит значительное снижение уровня этого свойства стали (рис. 4). При выдержке расплава необработанной модифицированной стали (кривая 1) наблюдается постепенное снижение величины σ_b во времени. Значения σ_b для обработанной электрическим полем в процессе модифицирования литой стали существенно уменьшаются с увеличением времени выдержки расплава стали (кривая 2). Изменение прочностных свойств необработанной и обработанной модифицированных сталей максимально при нулевой выдержке расплава стали и достигают минимума при времени выдержки, равной 30 мин. Такой характер изменения прочностных свойств литой стали можно объяснить активацией центров кристаллизации стали, образовавшихся в процессе модифицирования, под влиянием электрического поля. Однако количество таких центров кристаллизации стали резко уменьшается при увеличении времени изотермической выдержки расплава стали (кривая 2). Это свидетельствует о том, что в процесс кристаллизации обработанной в процессе модифицирования стали были вовлечены центры кристаллизации с меньшим, чем у необработанной модифицированной стали критическим радиусом зародыша кристалла [1].

Металлургический анализ показал, что максимальное увеличение прочностных свойств при минимальной изотермической выдержке расплава стали происходит по причине увеличения дисперсности структуры сплава. Феррито-перлитная структура литой стали претерпела существенное измельчение под влиянием электрического поля. Как показали измерения, проведенные на электронной вычислительной установке «Еriquant», средний размер зерна в обработанной модифицированной стали равен 18,5420 мкм (дисперсия среднего значения равна 1,1710; критерий разнотерности равен 0,056730), у необработанной модифицированной литой стали – 24,7290 мкм (дисперсия среднего значения равна 1,2530; критерий разнотерности равен 0,039610). На рис. 5 показана структура необработанной модифицированной стали, которая, как свидетельствуют измерения, менее дисперсная, чем феррито-перлитная структура обработанной электрическим полем модифицированной литой стали (рис. 6).

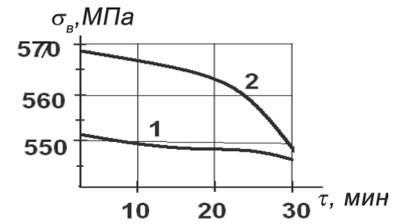


Рис. 4. Влияние термовременной обработки на результаты воздействия электрического поля в процессе модифицирования литой стали



Рис. 5. Феррито-перлитная структура необработанной модифицированной литой стали. x200

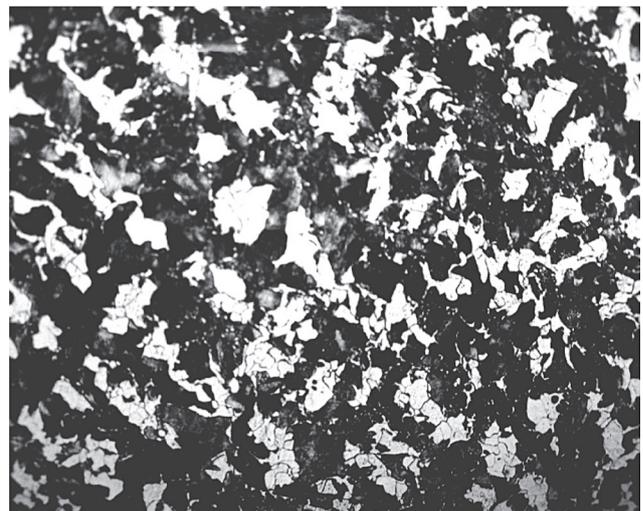


Рис. 6. Феррито-перлитная структура обработанной электрическим полем модифицированной литой стали. x200

В результате воздействия электрического поля в процессе модифицирования литой стали изменились условия протекания процесса кристаллизации, что и вызвало повышение прочностных свойств стали. Эти данные подтверждают наличие позитивного влияния обработки электрическим полем на зарождение центров кристаллизации [4], но их устойчивость резко падает при термовременной обработке расплава стали длительностью более 20 мин.

Таким образом, позитивное воздействие обработки электрическим полем в процессе модифицирования Fe-C-сплавов сводится, по нашему мнению, к влиянию на процесс растворения частиц модификатора конвективных потоков от выделения джоулева тепла и процесса передачи энергии ускоренных электрическим полем токоносителей образующимся, а также имеющимся в металлическом расплаве центрам кристаллизации. Суммарное воздействие этих двух факторов приводит к возникновению позитивного эффекта влияния электрического поля на прочностные свойства сплавов. Использование этого эффекта при получении модифицированных Fe-C-сплавов, безусловно, оптимизирует себестоимость литой заготовки, так как рост прочностных свойств сплава позволит уменьшить толщину стенки чугунной отливки и снизит ее металлоемкость.

Литература

1. М и н е н к о Г. Н. Влияние внешних полей на внепечную обработку литейных сплавов. Saarbrücken: Lambert Academic Publ., 2013. 108 p.
2. М и н е н к о Г. Н. Особенности процесса растворения и усвоения чугуном кремнийсодержащих модификаторов // Литейное производство. 1992. № 10. С. 11–12.
3. С е м е н о в В. И. Затвердевание литейных сплавов. М.: «Спутник+», 2014. 219 с.
4. М и н е н к о G. N. Factors of Influence of electric Field Treatment on the Processes of alloys Modification // Foundry Management & Technology. July, 2014. S. 22–23.

References

1. M i n e n k o G. N. *Vlijanie vnesnih polej na vnepechnuju obrabotku litejnyh splavov* [The influence of external fields on the ladle treatment of casting alloys] Saarbrücken, Lambert Academic Publishing, 2013, 108 p.
2. M i n e n k o G. N. *Osobennosti processa rastvorenija i usvoenija chugunom kremnijsoderzhashhjih modifikatorov* [Features of the dissolution process and assimilation of iron silicon modifiers] *Litejnoe proizvodstvo* [foundry] 1992, no.10, pp.11–12.
3. S e m j o n o v V. I. *Zatverdevanie litejnyh splavov* [Solidification of casting alloys]. Moscow, Sputnik + Publ., 2014. 219 p.
4. M i n e n k o G. N. Factors of Influence of electric Field Treatment on the Processes of alloys Modification. *Foundry Management & Technology*, July, 2014, pp. 22–23.

Сведения об авторе

Миненко Георгий Николаевич, канд. техн. наук, доцент, руководитель Ресурсного центра отраслевого машиностроения министерства образования Московской области; 140002. Московская область, г. Люберцы, Октябрьский пр., 114. моб. тел.: +7(909) 634-95-97.

Information about the authors

Minenko Georgy, PhD in engineering, associate professor, head of the Resource center of branch mechanical engineering of the Ministry of Education of the Moscow region; 140002 Moscow region, Lyubertsy, Oktyabrsky Ave., 114. mob. tel.: +7(909) 634-95-97.