

Совершенствование технологии позднего графитизирующего модифицирования при производстве тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна

А. А. Токарев, аспирант кафедры пирометаллургических и литейных технологий¹, эл. почта: 151@nppgroup.ru

А. В. Каляскин, аспирант кафедры пирометаллургических и литейных технологий¹, эл. почта: 155@nppgroup.ru

А. В. Бархатов, ведущий инженер-металлург², эл. почта: 181@nppgroup.ru

Е. В. Братковский, доцент кафедры металлургических технологий и оборудования³, канд. техн. наук, эл. почта: evbratk@yandex.ru

¹ Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия.

² ООО «Центр исследований и разработок «НПП», ООО НПП «Технология», Челябинск, Россия.

³ Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», Новотроицк, Россия.

Приведены результаты оценки влияния позднего графитизирующего модифицирования на формирование микроструктуры тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна. Проанализированы представленные в литературе гипотезы о механизме образования и роста графитных включений в чугуне. Анализ существующих теорий позволяет прогнозировать высокую эффективность графитизирующей обработки, максимально приближенной к моменту кристаллизации расплава. Отмечено, что идея поздней обработки заключается во введении графитизирующего модификатора в расплав чугуна в предкристаллизационный период, что позволяет обеспечить активное модифицирующее воздействие на жидкий металл за счет создания дополнительных центров кристаллизации графитных включений. Данный вид обработки позволяет получить в микроструктуре отливок из высокопрочного чугуна требуемую форму и диаметр шаровидного графита, равномерное его распределение, увеличить площадь графитовых включений, уменьшить риск появления дефектов усадочного характера, предотвратить образование цементита. Позднее модифицирование проведено с использованием литой вставки серии INOCSIL[®] производства компании ООО НПП «Технология» в литниковую систему литейной формы на действующем литейном предприятии. Представлены результаты металлографического исследования образцов отливок, полученных как по действующей технологии модифицирования, так и по опытной технологии с применением поздней графитизирующей обработки расплава. Анализ результатов металлографического исследования показал высокую эффективность поздней графитизирующей обработки по сравнению с действующей технологией ковшевого модифицирования. Применение позднего модифицирования позволило улучшить микроструктуру металла, а также повысить относительное удлинение более чем в 2 раза.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, литая вставка, микроструктура, шаровидный графит, отливка, позднее модифицирование, поздняя графитизирующая обработка, структурообразование, модификатор.

DOI: 10.17580/chm.2022.05.03

Введение

Прогресс машиностроения выдвигает требования по освоению производства тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна (ВЧ), которые способны успешно конкурировать с отливками из алюминиевых и стальных сплавов. Исследования удельной (отнесенной к массе сплава) и долговременной прочности литейных алюминиевых, стальных сплавов и чугунов с шаровидным графитом, подтвердили техническую перспективность и экономическую целесообразность применения тонкостенных отливок из ВЧ взамен алюминиевых и стальных отливок [1–5].

Существует ряд технологических особенностей производства тонкостенных отливок из ВЧ, которые оказывают влияние на микроструктуру, механические и литейные свойства чугуна. Основная проблема, с которой сталкиваются литейщики при производстве тонкостенных фасонных изделий, — отсутствие качественной проливаемости

отливки. С целью ее обеспечения необходимо увеличение температуры заливки, что, в свою очередь, может привести к образованию цементита в структуре готового изделия, формированию нежелательных форм графита и, как следствие, снижению механических свойств, возникновению дефектов усадочного характера.

Стабильность микроструктуры и высокий уровень технологических, механических и служебных свойств отливок из ВЧ достигается применением высококачественных шихтовых материалов, прогрессивных процессов плавки, модификаторов рационального состава, а также высокоэффективных методов модифицирования металла [3, 5–10].

Существуют различные способы ввода модификатора при проведении поздней графитизирующей обработки:

- в струю инжeksiрованием в потоке воздуха или нейтрального газа;

- в заливочную чашу в виде закрепляемых литых блоков (для крупнотоннажных отливок);
- в литниковую систему в виде литых вставок или таблеток [11].

Анализ тенденций развития технологий производства ВЧ свидетельствует, что наиболее перспективными являются более поздние методы модифицирования [10–14], совмещенные с операцией заливки литых форм. В результате сокращения до минимума интервала от модифицирования расплава до его кристаллизации поздняя графитизирующая обработка обеспечивает более высокий уровень модифицирующего воздействия на структурообразование ВЧ при значительно меньшем расходе модификатора [15, 16].

С учетом вышеизложенного актуальным является совершенствование технологии графитизирующего модифицирования при производстве тонкостенных отливок из ВЧ с применением наиболее эффективного модификатора.

В настоящее время разработано несколько теорий, объясняющих механизмы формирования и роста включений графита в процессе кристаллизации чугуна. Большинство теорий основаны на предположении, что графит в процессе кристаллизации образуется в результате гетерогенной кристаллизации на неметаллических включениях (подложках) [17], и такие элементы, как кальций (Ca), алюминий (Al), барий (Ba) и стронций (Sr), играют при этом существенную роль.

Известно, что в литых чугунах, обработанных магнием, образуются включения малых размеров, содержащие в основном оксиды магния (MgO), кальция (CaO), кремния (SiO_2) [18]. Они состоят из сульфидной сердцевинки (ядра) и многогранной силикатной оболочки. Сульфидное ядро содержит включения MgS и CaS , в то время как внешняя оболочка состоит из комплексных магниевых силикатов (например, $MgO \cdot SiO_2$, $2MgO \cdot 2SiO_2$) [19, 20]. Принято считать, что эти фазы не являются потенциальными центрами зарождения и роста включений графита в процессе кристаллизации расплава из-за различий типов кристаллических решеток неметаллического включения и графита [17].

После вторичного графитизирующего модифицирования на поверхности сульфидных и оксидных включений, образовавшихся в течение сфероидизирующей обработки чугуна, формируются шестиугольные силикатные фазы типа $CaSiO_3$ и $CaAl_2Si_2O_8$. Именно эти силикаты кальция затем могут выступать в качестве центров формирования на их поверхности включений графита в процессе дальнейшей кристаллизации расплава. Это может происходить благодаря тому, что кристаллическая структура силикатов кальция хорошо совпадает с кристаллической решеткой графита [17].

На рис. 1 проиллюстрировано влияние вторичной графитизирующей обработки на формирование включений в чугуне, обработанном магнием [17, 18].

Как видно из результатов металлографического исследования травленных образцов до и после проведения графитизирующей обработки, в образце (см. рис. 1, б) полностью отсутствует цементит.

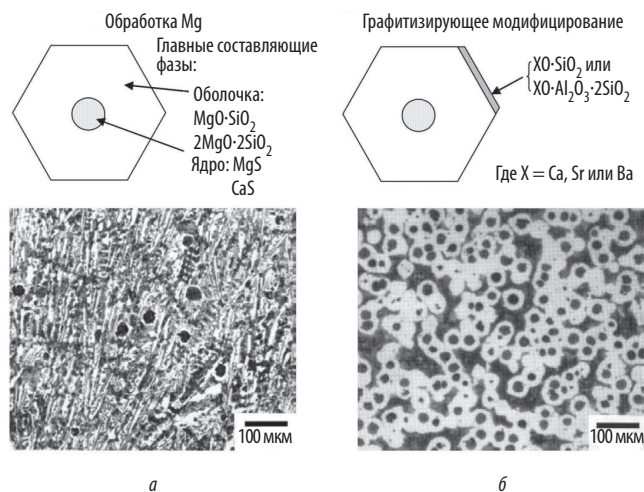


Рис. 1. Схематическое представление состава микровключения в ВЧ, обработанном магнием до (а) и после (б) проведения вторичного графитизирующего модифицирования

Таким образом, при производстве тонкостенных отливок из ВЧ могут возникнуть сложности с получением правильной шаровидной формы графита (ШГФ5), равномерным распределением включений графита и их количеством, наличием цементита в структуре отливки. Результатом вышеописанных проблем является нестабильность получаемых механических свойств.

Анализ литературных данных по теме поздней графитизирующей обработки чугуна показал, что основное внимание при производстве отливок из ВЧ уделяют проведению сфероидизирующей обработке, методам ввода модификаторов с магнием, их достоинствам и недостаткам и т. д. Что касается технологии внутриформенного модифицирования, то данная технология ввода представлена также только для процесса сфероидизирующей обработки [13–15, 19, 20].

Существует технология вторичного сфероидизирующего и графитизирующего модифицирования, осуществляемая одновременно как в ковше, так и в форме с использованием комплексной лигатуры, состоящей из 70 % ФСМг7 и 30 % SIBAR-22. Данная технология обеспечивает получение дисперсных графитовых включений шаровидной формы и повышение механических свойств, однако требует предварительного легирования расплава медью и проведения первичного графитизирующего модифицирования мелкофракционным ферросилицием ФС75, а также получения чугуна эвтектического состава [21].

Таким образом, вопросы поздней графитизирующей обработки, а именно обработки чугуна специальными вставками-модификаторами, способы их ввода, достоинства поздней графитизирующей обработки с точки зрения структурообразования на сегодняшний день освещены и изучены не в полном объеме.

Цель работы — совершенствование технологии производства тонкостенных отливок из ВЧ без структурно-свободного цементита со стабильно воспроизводимыми результатами механических свойств в условиях действующего производства.

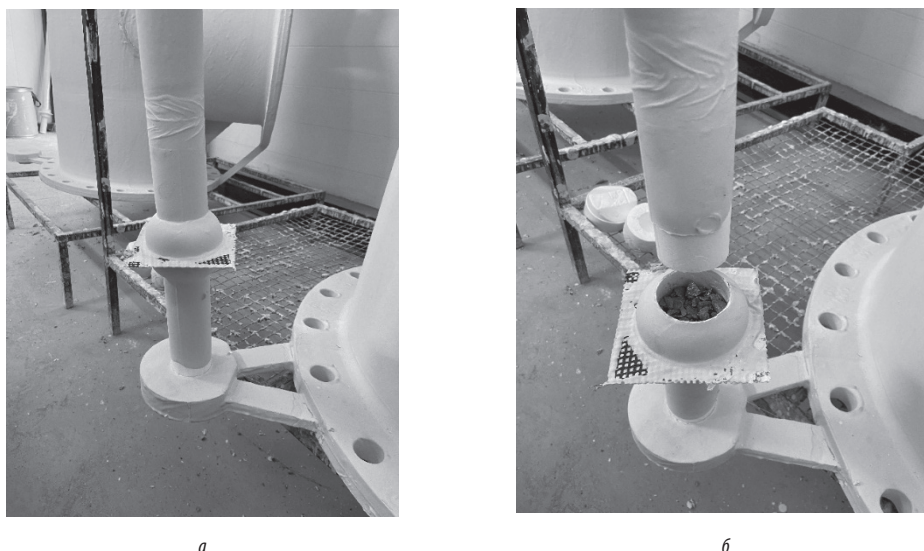


Рис. 2. Укладка графитизирующей вставки на сетчатый фильтр в стояк литейной формы:
а — общий вид литниковой системы; б — укладка вставки INOCSIL[®] SM120

Таблица 1

Химический состав модификаторов

Модификатор	Содержание основных элементов, % (мас.)						
	Mg	Al	Si	Ca	Ba	PЗМ	Fe
Сферомаг [®] 631-1	6,5–7,5	0,4–1,0	44–48	2,9–3,3	–	0,8–1,2	Остальное
SIBAR [®] 4	–	1–2	65–75	0,8–1,5	3,5–5	–	
INOCSIL [®] SM120	–	3,2–4,5	70–78	0,3–1,5	–	–	

Материалы и методы исследования

Для оценки эффективности позднего графитизирующего модифицирования при получении отливок из ВЧ40 на предприятии ООО «ЧугунСпецСтрой» (Липецк) были проведены опытные плавки при производстве фланцевых тройников 500×150 с минимальной толщиной стенки 7 мм и металлоемкостью 207 кг. Причиной выбора объекта исследования послужил тот факт, что основной проблемой при производстве таких фасонных отливок является сложность получения преимущественно правильной шаровидной формы графита (ШГФ5) и, как следствие, отсутствие воспроизводимости получаемых результатов механических свойств.

В ходе проведения опытных плавки металл выплавляли по действующей технологии в индукционной плавильной электропечи ИТПЭ-0,4/0,5 ТГ 2-ЭВ с кислой футеровкой.

Сфероидизирующую обработку металла проводили в поворотном ковше емкостью 400 кг с введением модификатора Сферомаг[®]631-1 в реакционную камеру при его расходе 15 кг/т жидкого металла.

Действующая на предприятии технология формообразования — литье по газифицируемым моделям. Используются полистирольные модели, вспененные в автоклаве, температура выпуска металла из печи в ковш — 1560 °С, температура заливки — 1500 °С. Такая высокая температура выпуска и заливки металла обусловлена особенностями конфигурации отливки и минимальной толщиной ее стенки (7 мм),

Таблица 2

Результаты механических испытаний

Технология модифицирования	Временное сопротивление при растяжении $\sigma_{\text{в}}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
Действующая	425	8
Опытная	430	18

Примечание. По причине длительного времени эксплуатации полученных отливок не представляется возможным установить результаты долговременной прочности и других служебных свойств.

при использовании более низких температур заливки существуют сложности с проливаемостью отливки. Продукты термодеструкции удаляются вакуумированием.

По действующей технологии графитизирующую обработку проводили модификатором SIBAR[®]4 с введением его поверх сфероидизирующего модификатора по технологии сэндвич-процесса с расходом 3 кг/т жидкого металла.

В ходе проведения опытной работы металл обрабатывали с применением графитизирующей вставки INOCSIL[®] SM120, которую встраивали в литниковую систему, непосредственно в стояк на сетчатый фильтр с расходом 1 кг/т жидкого металла, при этом графитизирующую обработку в ковше не проводили. На **рис. 2** представлена укладка графитизирующей вставки на сетчатый фильтр

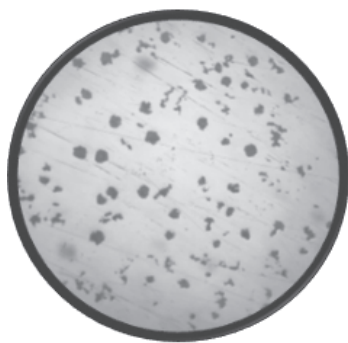


Рис. 3. Результаты металлографического исследования после ковшевой обработки сфероидизирующим модификатором Сферомаг®631-1 и графитизирующим модификатором SIBAR®4, $\times 100$

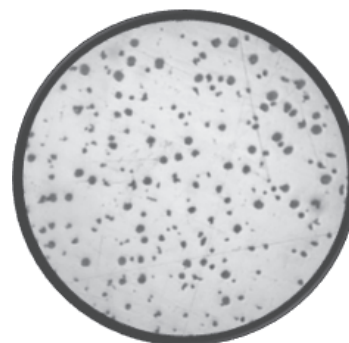


Рис. 4. Результаты металлографического исследования после ковшевой обработки сфероидизирующим модификатором Сферомаг®631-1 и поздним графитизирующим модифицированием INOCSIL®, $\times 100$

в стояк литейной формы. Химический состав используемых модификаторов представлен в **табл. 1**.

Для проведения металлографического исследования использовали портативный микроскоп Альтами МЕТ П для изучения микроструктуры непосредственно на изделиях. Для определения механических свойств применяли универсальную электромеханическую испытательную машину ТРМ-П 100 1С Toshline. Далее вырезали цилиндрические образцы (ГОСТ 1497 тип III [22]) из приливных проб.

По описанной выше технологии поздней графитизирующей обработки было проведено свыше 250 плавов, подтверждающих стабильность получения результатов по микроструктуре и механическим свойствам.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты металлографического исследования после обработки модификаторами по действующей технологии и с применением поздней графитизации представлены на **рис. 3, 4** соответственно.

На рис. 3 представлена типичная микроструктура отливок из ВЧ, получаемая по действующей на предприятии технологии ковшевого модифицирования с укладкой модификаторов (сфероидизирующего и графитизирующего) на дно ковша в реакционной камере. Согласно рис. 3, получаемые графитовые включения имеют разный диаметр (ШГд45–ШГд90), форму и распределение. На рис. 4 приведена микроструктура отливок из ВЧ после поздней графитизирующей обработки в литейной форме. На полученных по опытной технологии образцах (см. рис. 4) микроструктура имеет большее количество включений графита, измельченный размер (ШГд15–ШГд45), более равномерное и компактное распределение графита (ШГр1) по ГОСТ 3443–87 [23] по сравнению с действующей технологией (см. рис. 3). Анализ данных металлографического исследования показал, что модифицирование вставками позволило существенно увеличить степень графитизации металла. Результаты механических испытаний образцов представлены в **табл. 2**.

Из анализа данных табл. 2 следует, что применение поздней графитизирующей обработки позволило более чем в 2 раза повысить показатели пластичности при сохранении

прочностных характеристик. Технология позднего модифицирования снижает вероятность выпадения свободного цементита, уменьшает твердость и хрупкость металла, повышает долю феррита, что, в свою очередь, приводит к значительному увеличению показателя относительного удлинения.

Место размещения графитизирующей вставки имеет решающее значение. Оригинальность применяемой методики поздней графитизирующей обработки путем ввода вставки-модификатора в элемент литниково-питающей системы (стояк) заключается в том, что модифицирование расплава в этом случае происходит непрерывно, в то время, когда металл протекает через сетчатый фильтр перед попаданием в полость литейной формы.

В ходе использования модифицирующих вставок по технологии ввода на сетчатый фильтр в стояк наличие продуктов взаимодействия активных элементов модификатора с примесями в виде неметаллических включений не обнаружено.

Эффективность применения позднего модифицирования во многом обусловлена тем, что данная технология позволяет приблизить процесс обработки расплава к моменту его кристаллизации. В этом случае решается проблема затухания модифицирующего воздействия, характерная для технологии модифицирования жидкого чугуна в ковше, тогда как проведение внутрiformенного модифицирования позволяет минимизировать негативное влияние временного фактора и подобрать оптимальное число модифицирующих материалов.

На сегодняшний день ООО «ЧугунСпецСтрой» продолжает успешно работать по отработанной технологии с применением поздней графитизирующей обработки модифицирующей вставкой марки INOCSIL®SM120.

Выводы

Анализ результатов применения позднего графитизирующего модифицирования показывает, что данный этап технологического процесса производства отливок из чугуна с шаровидной формой графита оказывает существенное, а в некоторых случаях решающее влияние на формируемую микроструктуру, механические свойства и качество отливок.

Производство тонкостенных отливок из ВЧ с применением поздней графитизирующей обработки с использованием литых вставок INOCSIL®SM120 является эффективным методом влияния на микроструктуру металла и позволяет:

- снизить расход графитизирующего модификатора в 3 раза;
- получить измельченные, равномерно распределенные включения графита;
- повысить пластические свойства отливок более чем в 2 раза;
- предотвратить образование цементита в микроструктуре отливки.



Библиографический список

1. *Stefanescu D. M., Ruxanda R.* Lightweight iron castings-can they replace aluminum castings // *Foundryman*. 2003. No. 9. P. 221–224.
2. *Borrajó J. M., Martínez R. A., Boeri R. E., Sikora J. A.* Shape and count of free graphite particles in thin wall ductile iron castings // *ISIJ International*. 2002. Vol. 42. No. 3. P. 257–263.
3. *Delprete C., Sesana R.* Experimental characterization of a Si – Mo – Cr ductile cast iron // *Materials and Design*. 2014. Vol. 57. P. 528–537.
4. *Gorny M., Lelito J., Kawalec M., Sikora G.* Thermal conductivity of thin walled compacted graphite iron castings // *ISIJ International*. 2015. Vol. 55. No. 9. P. 1925–1931.
5. *Çelik G. A., Tzini M. T., Polat, Ş.* et al. Thermal and microstructural characterization of a novel ductile cast iron modified by aluminum addition // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2020. Vol. 27. P. 190–199.
6. *Беляков А. И., Жуков А. А.* Производство отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. — М.: Машиностроение, 2010. — 712 с.
7. *Shameikhanova N. A., Uskenbayeva A. M., Volochko A. T., Korolyov S. P.* The study of the role of fullerene black additive during the modification of ductile cast iron // *Materials Science Forum*. 2017. Vol. 891. P. 235–241.
8. *Rahmadi F. D.* Effect of strontium addition in graphite morphology and nodularization of hypoeutectic cast iron // *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1000. P. 454–459.
9. *Коровин В. А., Леушин И. О., Героцкий В. А.* Совершенствование процесса модифицирования высокопрочного чугуна // *Черные металлы*. 2009. № 7. С. 1–7.
10. *Слузов П. А., Седунов В. К., Коровин В. А., Леушин И. О.* Высокопрочный чугун, проволочный модификатор, расплав, карбонаты, структура, механические свойства // *Черные металлы*. 2014. № 11. С. 1–18.
11. *Lerner Y. S., Riabov M. V.* Iron inoculation: an Overview of methods // *Modern casting*. 1999. No. 6. P. 37–41.
12. *Csenka J. M.* Ductile iron trends: reducing costs, improving quality // *Modern casting*. 2002. No. 5. P. 27–29.
13. *Михайловский В. М., Королев С. П., Константинович О. А., Шешко А. Г.* Позднее внутриформенное графитизирующее модифицирование — эффективный способ предотвращения отбела в чугунном литье // *Литье и металлургия*. 2010. № 1–2. С. 95–97.
14. *Lia B.-G., Sim K.-H., Kim R.-C.* Effect of Sb – Ba – Ce – Si – Fe post inoculants on microstructural and mechanical properties of As – cast pearlitic ductile iron // *Steel research international*. 2019. Vol. 90. P. 1800530.
15. *Бубликов В. Б.* Повышение модифицирующего воздействия на структурообразование высокопрочного чугуна // *Литейное производство*. 2003. № 8. С. 20–22.
16. *Mohamed M. M., Shima E.-H., Mervat M. I., Adel A. N.* Effect of processing parameters on the mechanical properties of heavy section ductile iron // *Journal of Metallurgy*. 2015. Vol. 9. P. 1–11.
17. *Олсен С. О., Скаланд Т., Хартунг К.* Модифицирование серых и высокопрочных чугунов. Сравнение центров кристаллизации и некоторые практические рекомендации по модифицированию // *Литейщик России*. 2011. № 2. С. 1–6.
18. *Skaland T., Grong T. A.* A model for graphite formation in ductile iron // *Metallurgical Transactions A*. 2013. Vol. 24, Iss. 10. P. 2347–2353.
19. *Болдырев Д. А., Попова Л. И., Прасолов С. Г., Мураткин Г. В.* Ключевые параметры процессов модифицирования при получении серого и высокопрочного чугунов // *Литейное производство*. 2021. № 5. С. 4–8.
20. *Зенкин П. Н.* Механизм и разновидности модифицирования высокопрочного чугуна // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2014. № 1. С. 1–9.
21. Пат. 2402317 РФ. Способ измельчения графитовых включений в высокопрочном чугуне / К. В. Макаренко ; заявл. 10.04.2010 ; опубл. 27.10.2010, Бюл. № 30.
22. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. — Введ. 01.01.1986. — М.: Издательство стандартов, 1984.
23. ГОСТ 3443–87. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры. — Введ. 01.07.1988. — М.: Издательство стандартов, 1987.

“Chernye metally”, 2022, No. 5, pp. 16–21
DOI: 10.17580/chm.2022.05.03

Improving the technology of late inoculation in the production of thin-walled castings from ductile iron

Information about authors

A. A. Tokarev, Postgraduate Student, Dept. of Pyrometallurgical and Foundry Technologies¹, e-mail: 151@nppgroup.ru;

A. V. Kalyaskin, Postgraduate Student, Dept. of Pyrometallurgical and Foundry Technologies¹, e-mail: 155@nppgroup.ru;

A. V. Barkhatov, Leading Metallurgical Engineer², e-mail: 181@nppgroup.ru;

E. V. Bratkovsky, Cand. Eng., Associate Professor, Dept. of Metallurgical Technologies and Equipment³, e-mail: evbratk@yandex.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

² SPE Research and Development Center Ltd., NPP Tekhnologiya Ltd., Chelyabinsk, Russia.

³ Novotroitsk branch of NUST MISIS, Novotroitsk, Russia.

Abstract: The article presents the results of evaluating the impact of late inoculation on formation of the microstructure of thin-wall castings from ductile iron. Existing hypotheses about the mechanism of formation and growth of graphite inclusions in the iron are analyzed. The analysis of the existing theories makes it possible to predict the high efficiency of inoculation treatment

as close as possible to melt crystallization. It is noted that idea of late treatment is in introducing of inoculants into the iron melt in the pre-crystallization period, what make it is possible to provide high inoculation impact on the molten metal by creating additional crystallizing nuclei of graphite. Presented type of inoculation treatment makes it possible to obtain the required shape and diameter of nodular graphite, its uniform distribution, increase the area of graphite inclusions, reduce risk of shrinkage defects, and prevent the formation of cementite. In the presented research work the late inoculation was carried out by integrating of solid inserts of the INOCSIL® series produced by NPP Technology Company in the gating feeding system of the mould on the existing foundry factory. It is given the results of metallographical tests of samples from the castings obtained both by the current inoculation treatment of iron and by late inoculation treatment technology. The analysis of results of metallographical research showed the high efficiency of late inoculation compare with the existing technology of ladle treatment on the foundry. The use of late inoculation treatment technology made it possible to improve the microstructure of metal and increase the elongation by more than two times.

Key words: ductile iron, solid insert, microstructure, nodular graphite, casting, late inoculation, inoculation treatment, microstructure formation, inoculants.

References

1. *Stefanescu D. M., Ruxanda R.* Lightweight iron castings-can they replace aluminum castings. *Foundryman*. 2003. No. 9. pp. 221–224.
2. *Borrajó J. M., Martínez R. A., Boeri R. E., Sikora J. A.* Shape and count of free graphite particles in thin wall ductile iron castings. *ISIJ International*. 2002. Vol. 42. No. 3. pp. 257–263.

3. Delprete C., Sesana R. Experimental characterization of a Si – Mo – Cr ductile cast iron. *Materials and Design*. 2014. Vol. 57. pp. 528–537.
4. Gorny M., Lelito J., Kawalec M., Sikora G. Thermal conductivity of thin walled compacted graphite iron castings. *ISIJ International*. 2015. Vol. 55. No. 9. pp. 1925–1931.
5. Çelik G. A., Tzini M. T., Polat, Ş. et al. Thermal and microstructural characterization of a novel ductile cast iron modified by aluminum addition. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2020. Vol. 27. pp. 190–199.
6. Belyakov A. I., Zhukov A. A. Production of castings from ductile iron with nodular graphite. Moscow: Mashinostroyeniye, 2010. 712 p.
7. Shamelkhanova N. A., Uskenbayeva A. M., Volochko A. T., Korolyov S. P. The study of the role of fullerene black additive during the modification of ductile cast iron. *Materials Science Forum*. 2017. Vol. 891. pp. 235–241.
8. Rahmadi F. D. Effect of strontium addition in graphite morphology and nodularization of hypoeutectic cast iron. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1000. pp. 454–459.
9. Korovin V. A., Leushin I. O., Gerotsky V. A. Improvement of the process of modifying high strength iron. *Chernye Metally*. 2009. No. 7. pp. 1–7.
10. Sluzov P. A., Sedunov V. K., Korovin V. A., Leushin I. O. Progressive technology of modification of high-strength iron. *Chernye Metally*. 2014. No. 11. pp. 1–18.
11. Lerner Y. S., Riabov M. V. Iron inoculation: an Overview of methods. *Modern casting*. 1999. No. 6. pp. 37–41.
12. Csenka J. M. Ductile iron trends: reducing costs, improving quality. *Modern casting*. 2002. No. 5. pp. 27–29.
13. Mikhaylovsky V. M., Korolev S. P., Konstantinovich O. A., Sheshko A. G. Late in-mould graphitizing modification is an effective way to prevent chill in cast iron. *Lityo i metallurgiya*. 2010. No. 1–2. pp. 95–97.
14. Lia B.-G., Sim K.-H., Kim R.-C. Effect of Sb – Ba – Ce – Si – Fe post inoculants on microstructural and mechanical properties of As – cast pearlitic ductile iron. *Steel research international*. 2019. Vol. 90. p. 1800530.
15. Bublikov V. B. Increasing the modifying effect on the structure formation of ductile iron. *Liteynoe proizvodstvo*. 2003. No. 8. pp. 20–22.
16. Mohamed M. M., Shima E.-H., Mervat M. I., Adel A. N. Effect of processing parameters on the mechanical properties of heavy section ductile iron. *Journal of Metallurgy*. 2015. Vol. 9. pp. 1–11.
17. Olsen S. O., Skaland T., Hartung K. Modification of gray and high-strength cast irons. Comparison of nucleation sites and some practical recommendations for modification. *Liteyshchik Rossii*. 2011. No. 2. pp. 1–6.
18. Skaland T., Grong T. A. A model for graphite formation in ductile iron. *Metallurgical Transactions A*. 2013. Vol. 24, Iss. 10. pp. 2347–2353.
19. Boldyrev D. A., Popova L. I., Prasolov S. G., Muratkin G. V. Key parameters of modification processes in the production of gray and ductile irons. *Liteynoe proizvodstvo*. 2021. No. 5. pp. 4–8.
20. Zenkin R. N. Mechanism and varieties of modification of high-strength cast iron. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2014. No. 1. pp. 1–9.
21. Makarenko K. V. Method for refinement of graphite inclusions in high-strength cast iron. Patent RF. No. 2402317. Applied: 10.04.2010. Published: 27.10.2010. Bulletin No. 30.
22. GOST 1497–84. Metals. Methods of tension test. Introduced: 01.01.1986. Moscow: Izdatelstvo standartov, 1984.
23. GOST 3443–87. Cast iron castings with graphite of different form. Methods of structure determination. Introduced: 01.07.1988. Moscow: Izdatelstvo standartov, 1987.