

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРВИЧНОЙ СТРУКТУРЫ СЕРОГО ЧУГУНА С НАНОСТРУКТУРНЫМИ ПРИСАДКАМИ

А.С. РАКОВЕЦ, Д.В. КУИС, канд. техн. наук,

Н.А. СВИДУНОВИЧ, д-р техн. наук

Белорусский государственный технологический университет

*В статье приведены результаты исследований первичной структуры серого чугуна, полученного модифицированием ферросилицием с барием и лигатурой с наноуглеродными компонентами. Описана методика выявления дендритной структуры и эвтектического зерна.*

*Установлено, что разрабатываемые модификаторы за счет непосредственного ввода в расплав центров кристаллизации в виде дисперсных углеродных частиц позволяют значительно повысить эффект модифицирования, увеличить прочностные характеристики и снизить затраты на модификаторы благодаря их меньшему расходу.*

**Ключевые слова:** *первичная структура чугуна, модифицирование, наноуглеродные компоненты, прочностные характеристики.*

## STUDY OF THE PRIMARY STRUCTURE OF GRAY CAST IRON WITH NANOSTRUCTURAL ADDITIVES

A.S. RAKOVETS, D.V. KUIS, Ph. D in Technical Science,

N.A. SVIDUNOVICH, Dr. of Engineering Sciences

Belorussian State Technological University

*The article investigates the primary structure of gray cast iron obtained by modifying ferrosilicon with barium and an alloy with nanocarbon components. A technique for revealing the dendritic structure and eutectic grain is described.*

*It has been established that developed modifiers due to direct introduction of crystallization centers in the form of dispersed carbon particles into melt, can significantly increase the effect of modification, enhance the strength characteristics and reduce the cost of modifiers due to their lower consumption.*

**Keywords:** *primary structure of cast iron, modification, nanocarbon components, strength characteristics.*

**Введение.** Оценка механических свойств серого чугуна по результатам испытаний образцов, отлитых совместно или отдельно от отливок, не позволяет достаточно полно судить о свойствах металла в отливках, а изготовление образцов непосредственно из отливок далеко не всегда возможно. В этом случае целесообразным является определение свойств чугуна по его структуре. Знание этой зависимости важно также с точки зрения более полного понимания природы явлений, обуславливающих изменение механических свойств и возможность воздействовать на эти свойства.

Однако применяемые в настоящее время методы металлографического анализа ограничиваются обычно оценкой количества, формы и расположения включений графита, структуры матрицы. Обычные стандартные определения недостаточны для описания характеристики структуры, которая является главным фактором при определении механических свойств чугуна.

Большое значение имеет изучение первичной структуры чугуна, включая величину эвтектического зерна и характеристику первичного (предэвтектического) аустенита. В отношении этих характеристик имеется мало данных, и зачастую они противоречивы. Вторичная структура матрицы, обычно наблюдаемая под микроскопом, изучена более полно.

Поэтому исследование влияния характеристик первичной структуры чугуна на его свойства позволяет в дополнение к стандартным методикам испытаний более полно судить о механических свойствах чугуна в отливках. Более того, на современном этапе теории и технологии производства отливок широкое распространение получило модифицирование чугуна графитизирующими модификаторами, в том числе и смесевыми, при этом их использование показывает необходимость применения новых материалов в виде наномодификаторов. Следует отметить, что применение наномодификаторов мало изучено, хотя известно, что ввод наноразмерных частиц в расплав при низком расходе модификаторов может обеспечить значительный и длительный эффект.

В настоящее время направление наномодифицирования находится в зачаточном состоянии, поэтому в данной статье при решении проблем наномодифицирования в большой степени уделено внимание изучению первичной структуры [1–6].

**Результаты исследований.** Для исследований была выплавлена партия образцов, характеристики которых приведены в таблице 1. В качестве наноглеродных компонентов использовали фуллерено-содержащую сажу. С целью обеспечения усвоения высокодисперсных углеродных частиц расплавом в качестве добавок в составе комплексного модификатора применяли прессованные алюминий-кремниевые лигатуры, содержащие наноглеродные компоненты. При этом известна высокая эффективность алюминия в составах модификаторов длительного действия [6], что определяет целесообразность его использования.

Таблица 1 – Образцы серого чугуна, полученные для исследований

№ образца	Модификатор	Время выдержки расплава, мин
1	Без модификатора	0
2	FeSiBa	0
3	FeSiBa	15
4	FeSiBa + алюминий-кремниевая лигатура	0
5	FeSiBa + алюминий-кремниевая лигатура	15

Первичная структура формируется в процессе кристаллизации чугуна, которая состоит из двух этапов: выделения первичного (предэвтектического) аустенита и эвтектического превращения. Фазами первичной кристаллизации является предэвтектический (первичный) аустенит или графит, и колонии эвтектики, состоящей в свою очередь из аустенита и графита.

Дендриты предэвтектического (первичного) аустенита выявлялись путем травления шлифов в смеси серной ( $H_2SO_4$ ) и борной ( $H_2BO_3$ ) кислот. Серная кислота (удельный вес 1,84) нагревалась до 90–100 °С, после чего добавлялась до насыщения мелкокристаллическая борная кислота. Для выявления дендритов достаточна была двух-трехкратная переполировка шлифа. После травления шлиф необходимо слегка отполировать для снятия образующихся поверхностных оксидов, после чего его можно рассматривать под микроскопом.

С увеличением степени эвтектичности или под действием модификаторов характер кристаллизации дендритов аустенита меняется от длинных разветвлений к более коротким, округлым (рисунок 1).

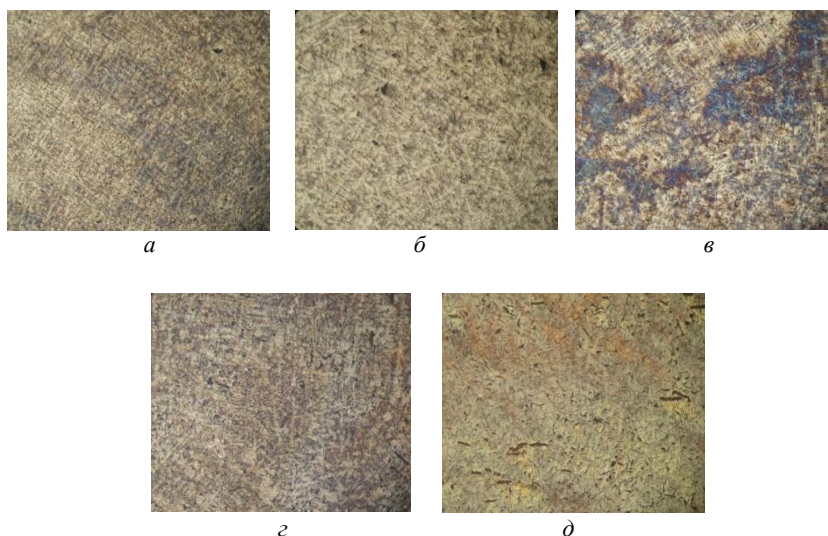


Рисунок 1 – Дендриты первичного аустенита немодифицированного (*a*) и модифицированного FeSiBa (*б*), модифицированного FeSiBa + лигатура (*в*), модифицированного FeSiBa + выд. 15 мин (*г*), модифицированного FeSiBa + лигатура + выд. 15 мин (*д*) серого чугуна ( $\times 50$ )

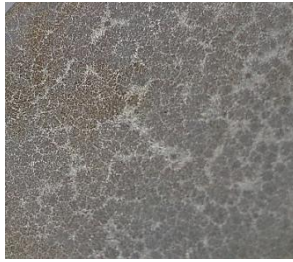
В исходном образце без модификатора (рисунок 1, *a*) наблюдается ярко выраженная дендритная структура с разветвленными и частично округлыми дендритами по всей поверхности шлифа. При модифицировании расплава FeSiBa (рисунок 1, *б*) видна сетка из длинных дендритов, проходящих через площадь шлифа, на фоне равномерно распределенных включений графита. При выдержке расплава с FeSiBa в течение 15 мин (рисунок 1, *в*) дендриты крупные и длинные проходят почти через всю поверхность шлифа. Также имеются и округлые дендриты, занимающие площадь до 60–70 %, т. е. идет процесс затухания модифицирующего эффекта. При вводе лигатуры в расплав (рисунок 1, *г*) дендриты не обнаруживаются, а количество и размер графитных включений значительно увеличилось, что свидетельствует об эффективности добавки.

Крупные включения графита растут из одного центра (розеточный графит), который представляет собой эвтектические зерна, имеющие границы. При выдержке расплава с лигатурой (рисунок 1, д) дендриты приобретают разветвленный вид, т. е. ориентированы большими осями с ответвлениями округлых дендритов.

Учитывая описанное выше, при обработке чугуна бариевым модификатором с добавками алюминий-кремниевой лигатуры наблюдается на площади шлифа каркас мелких и тонких переплетающихся между собой ветвей дендритов, между которыми заполняется эвтектика, что создает прочный каркас, определяющий значительную роль в прочности чугуна. По-видимому, создание каркаса мелких, тонких и переплетающихся ветвей дендритов связано с природой и особенностью ультрадисперсных наномодификаторов. Это обеспечивает эффективность их действия по сравнению с традиционными модификаторами, и связано с наноразмерностью частиц кремния и углерода, составляющих основу таких модификаторов.

Для выявления эвтектического зерна (рисунок 2) применяли реактив следующего состава:  $\text{CuSO}_4$  – 3 г, пикриновая кислота – 3 г, концентрированная кислота  $\text{HCl}$  (20  $\text{см}^3$  этиловый спирт – 100  $\text{см}^3$ ). При обычном травлении в холодном реактиве в течение 30 с границы эвтектических зерен хорошо выявляются в сером чугуне с любой структурой металлической основы.

При введении модификатора резко увеличивается число центров кристаллизации при эвтектическом превращении, что приводит к значительному измельчению эвтектического зерна. Одновременно в связи с уменьшением переохлаждения укрупняется графит. Подсчет количества эвтектических зерен чугуна, модифицированного показал следующее: у исходного образца количество зерен составляет 186 шт/ $\text{см}^2$ , при заливке в форму сразу после модифицирования количество эвтектических зерен в модифицированном FeSiBa чугуне составляет 273 шт/ $\text{см}^2$ , при введении лигатуры количество зерен – 432 шт/ $\text{см}^2$ . Т. е. с течением времени стандартный модификатор теряет свою «живучесть», но использование его в комплексе с лигатурой увеличивает время его действия и сохраняет эффект модифицирования.



*a*



*б*



*в*



*г*



*д*

Рисунок 2 – Эвтектические зерна немодифицированного (*a*) и модифицированного FeSiBa (*б*), модифицированного FeSiBa + выд. 15 мин (*в*), модифицированного FeSiBa + лигатура (*г*), модифицированного FeSiBa + лигатура + выд. 15 мин (*д*) серого чугуна

**Заключение.** В результате проведенных исследований установлено, что наибольшее влияние на увеличение числа эвтектических зерен и уменьшение глубины отбела по сравнению с исходным немодифицированным чугуном, и с чугуном, модифицированным одним модификатором FeSiBa, оказывают добавки FeSiBa + алюминий-кремниевая лигатура.

Следует также отметить, что кроме модифицирующего эффекта, добавки наноуглеродных компонентов приближают состав чугуна к эвтектическому, следовательно, уменьшается количество и размеры, и увеличивается расслоение между дендритами. То же самое наблюдается при выдержке модифицированного чугуна.

### Список литературы

1. **Болдырев, Д.А.** Новые смесевые модификаторы для инокулирующей обработки чугунов / Д.А. Болдырев, А.В. Чайкин // Литейщик России. – 2007. – № 3. – С. 32–36.

2. **Повышение** качества чугунных отливок с помощью нанопорошков. Г.Г. Крушенко [и др.] // Металлургия машиностроения. – 2002. – № 2(9). – С. 20–21.

3 **Давыдов, С.В.** Технология наномодифицирования доменных и ваграночных чугунов / С.В. Давыдов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2005. – № 2. – С. 3–9.

4. **Колокольцев, С.Н.** Углеродные материалы. Свойства, технологии, применения / С.Н. Колокольцев. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2012. – 290 с.

5. **Мищенко, С.В.** Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение / С.В. Мищенко. – М.: Машиностроение. – 2008. – 320 с.

6. **Писаренко, Л.З.** Модификатор длительного действия / Л.З. Писаренко // Литье и металлургия. – 2006. – № 2. – С. 84–90.

### References

1. **Boldyrev, D.A.** *Novye smesevye modifikatory dlya inokuliruyushchej obrabotki chugunov* [New mixed modifiers for inoculating cast iron] / D.A. Boldyrev, A.V. CHajkin // *Litejshchik Rossii = Foundry of Russia*. – 2007. – No. 3. – P. 32–36.

2. **Povyshenie kachestva chugunnyh otlivok s pomoshch'yu nanoporoshkov** [Improving the quality of iron castings using nanopowders] / G.G.Krushenko [et al.] // *Metallurgiya mashinostroeniya = Metallurgy of mechanical engineering*. – 2002 – No. 2(9). – P. 20–21.

3. **Davydov, S.V.** *Tekhnologiya nanomodificirovaniya domennyh i vagranochnyh chugunov* [Technology of nanomodification of blast furnace and cupola cast irons] / S.V. Davydov // *Zagotovitel'nye*

*proizvodstva v mashinostroenii = Blank production in mechanical engineering.* – 2005. – No. 2. – P. 3–9.

**4. Kolokol'cev, S.N.** *Uglerodnye materialy. Svoystva, tekhnologii, primeneniya* [Carbon materials. Properties, technologies, applications] / S.N. Kolokol'cev. Dolgoprudny: Izdatel'skij Dom «Intellect» Publ., 2012. – 290 p.

**5. Mishchenko, S.V.** *Uglerodnye nanomaterialy. Proizvodstvo, svoystva, primenenie* [Carbon nanomaterials. Production, properties, – application] / S.V. Mishchenko. – Moscow: Mashinostroenie Publ., 2008. – 320 p.

**6. Pisarenko, L.Z.** *Modifikator dlitel'nogo dejstviya* [Long lasting modifier] / L.Z. Pisarenko // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy.* – 2006. – No. 2. – P. 84–90.

*Посмунла 25.10.2021*

*Received 25.10.2021*