

## Глава 2

# Прогрессивные технологии производства отливок из чугуна и стали

УДК 669.131

### Структурные и химические особенности карбида кремния и их влияние на специфику его усвоения расплавом чугуна

Болдырев Д. А.<sup>1</sup>, Токарев А.А.<sup>2</sup>, Кулаков Б.А.<sup>3</sup>, Попова Л.И.<sup>4</sup>,  
Прасолов С.Г.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>АО «АВТОВАЗ», Тольятти, Россия

<sup>2</sup>ООО «НПП «Технология», Челябинск, Россия

<sup>3</sup>ЮУрГУ, Челябинск, Россия

<sup>4</sup>ТГУ, Тольятти, Россия

Denis.Boldyrev@vaz.ru

**Аннотация.** При отработке технологии выплавки расплава чугуна с использованием карбида кремния установлена различная степень его усвоения как в общем, так и отдельно по основным элементам – углероду и кремнию. По результатам проведенного дифракционного и электронно-микроскопического исследования с рентгено-спектральным микроанализом описаны реальные структурные и химические особенности промышленного карбида кремния. Фазовый состав карбида кремния неоднороден и состоит из частиц кристаллического карбида кремния  $\alpha$ -SiC и окисленного некристаллического карбида кремния, основу которого составляет твердый раствор «углерод-кремний». Усвоение карбида кремния расплавом чугуна, определяемое по

приросту углерода и кремния в процессе выплавки, имеет обратную зависимость от содержания фазы  $\alpha$ -SiC.

Ключевые слова: *карбид кремния, рентгеноспектральный микроанализ, дифракционный анализ.*

До настоящего времени традиционными шихтовыми материалами для выплавки серого и высокопрочного чугунов являются графит (в зёрнах, измельчённый) и ферросилиций, как правило, марки ФС45. Данные материалы являются основными продуктами, т.к. изготавливаются из исходных материалов и применяются по прямому назначению, что вызывает их относительно высокую стоимость. При этом применяемый графит поставляется без активирующей обработки, с чем связано его низкое усвоение расплавом, а ферросилиций имеет в своём составе поступающие из кварцита неконтролируемые примеси.

Выигрышной технико-экономической альтернативой применению данных традиционных материалов является применение в чугунолитейном производстве в качестве шихтового материала — источника углерода и кремния — карбида кремния [1, 2]. В данном случае углерод и кремний являются продуктами разложения в виде чистых элементов без присутствия неконтролируемых примесей. Дополнительным техническим эффектом является снижение общей массы шихтозавалки в плавильной печи с каждой тонны карбида кремния, используемой взамен графита измельчённого и ферросилиция ФС45.

Однако в процессе промышленной апробации карбида кремния отмечается нестабильность его усвоения расплавом чугуна, проявляющаяся в разных случаях в преимущественном усвоении углерода или кремния. Для установления причин такой специфики усвоения карбида кремния были отобраны по одной измельчённой пробе с каждой из 3-х партий карборунда фр. 0-10 мм с содержанием SiC 92-95%, имеющих отклонения в усвоении основных элементов: 1 — условно «качественный» образец, 2 — некачественный образец, не обеспечивающий прироста графита, 3 — некачественный образец, не обеспечивающий прироста кремния.

Методики проведения исследований приведены в табл. 1.

Для рентгеноспектрального микроанализа, образцы проб были нанесены на углеродную подложку. Из спектров исключены все примесные элементы, оставлены только основные элементы — углерод, кремний и кислород. Электронно-микроскопические изображения получены при помощи детектора обратно отражённых электронов. Степень серого на данных изображениях характеризует химический состав исследуемого вещества (чем светлее — тем больше порядковый номер элементов, входящих в состав, по таблице Менделеева).

Таблица 1: Методики проведения исследований

| Наименование показателей           | Оборудование                                  |
|------------------------------------|---|
| Электронно-микроскопический анализ | Электронный сканирующий микроскоп LEO1455VP   |
| Рентгеноспектральный микроанализ   | Рентгеновский энергодисперсионный спектрометр |
| EDX                                | X-MAX80                                       |
| Рентгенофазовый анализ             | Рентгеновский дифрактометр ARL X'Tra          |

Численные результаты весового содержания элементов в приведённом рентгеноспектральном микроанализе носят качественный характер. Анализ показал наличие в исследуемых образцах следующих 4-х фаз: карбид кремния гексагональный (незначительное количество, при дальнейшем анализе не учитывался), карбид кремния ромбоэдрический ( $\alpha$ -SiC), графит, кремний. Содержание в образцах углерода, кремния и карбида кремния ромбоэдрического ( $\alpha$ -SiC) показано в табл. 1. Общий вид дифрактограмм для всех 3-х образцов приведён на рис. 1. Обнаруженные при проведении анализа фазы на примере образца №3 приведены на рис. 2.

Таблица 2: Интегральные интенсивности 3-х обнаруженных фаз в относительных единицах

| № образца | Интегральная интенсивность пиков идентифицированных фаз, отн. ед. |          |                      |
|-----------|---|----------|----------------------|
|           | Si, 3,14Å   | C, 3,36Å | $\alpha$ -SiC, 2,57Å |
| 1         | 21  | 11       | 11                   |
| 2         | 19  | 3        | 28                   |
| 3         | 26  | 14       | 49                   |

Морфологические типы частиц в каждом из 3-х исследованных образцов – идентичны, они представлены 2-мя основными типами, это – монолитные, однородные менее окисленные частицы с более высоким по сравнению с углеродом содержанием кремния (1-й тип) и более окисленные частицы-конгломераты с преобладающим содержанием углерода, состоящие из большого количества более мелких частиц, связанных рыхлой, пористой углеродной массой (2-й тип). Весовое стехиометрическое соотношение кремния к углероду 7/3 в обоих типах частиц не соблюдается. Фактические значе-

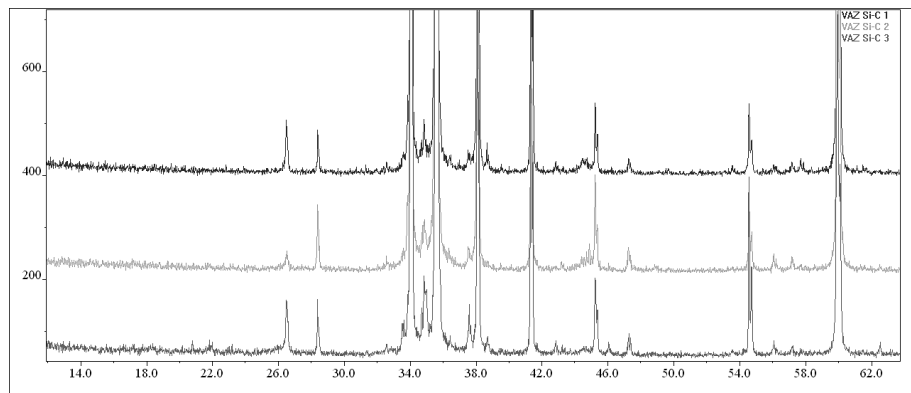


Рис. 1: Общий вид дифрактограмм для 3-х образцов

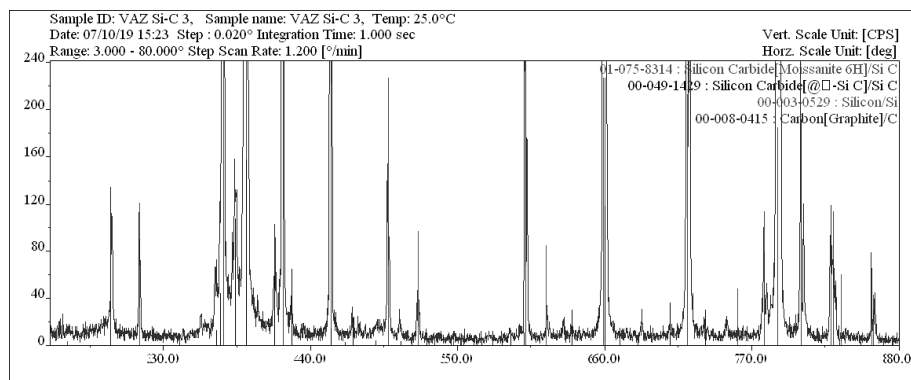


Рис. 2: Обнаруженные при проведении анализа фазы на примере обр. №3

ния данного соотношения как больше, так и меньше стехиометрического. Образцы отличаются между собой количественным соотношением частиц обоих типов и их размерами.

Частицы 2-го типа и частицы непрореагировавшего кокса располагаются по большей части в порах и углублениях частиц 1-го типа. Образец №1 представлен преимущественно самыми крупными частицами 1-го типа. Частицы 1-го типа наименее окислены по сравнению с аналогичными частицами других образцов. В образце №2 по сравнению с остальными преобладают более окисленные частицы 2-го типа с превышением в них содержания углерода над кремнием. В образце №3 по сравнению с остальными, напротив, преобладают более окисленные частицы 2-го типа с превышением в

них содержания кремния над углеродом.

На основе комплексного качественного микрорентгеноспектрального и рентгенофазового анализов можно заключить, что промышленный карбид кремния представляет собой неоднородный материал, состоящий из частиц кристаллического карбида кремния  $\alpha$ -SiC и окисленного некристаллического карбида кремния, основу которого составляет твердый раствор «углерод-кремний». Это подтверждается отсутствием идентифицированной кристаллической решётки кремний-углеродной фазы постоянного состава при рентгенофазовом анализе, который воспринимает её не как единую фазу, а как независимую совокупность углерода и кремния. Общее ухудшение усвоения расплавом чугуна образцов карбида кремния №2 и №3 по сравнению с образцом №1 напрямую связано с увеличением в них в 2,5-4,5 раза доли кристаллического карбида кремния  $\alpha$ -SiC по сравнению с некристаллическим карбидом кремния.

Анализ содержания и усвоения расплавом чугуна углерода и кремния из образцов №№2 и 3 показывает, что несмотря на самое высокое содержание в образце №3 углерода и кремния, из него усваивается только углерод, следовательно, в окисленном, не вызывающем прироста состоянии в большей степени находится именно кремний; снижение прироста углерода при использовании образца карбида кремния №2 обусловлено его минимальным совокупным в нём содержанием.

На основе проведённого анализа впоследствии были проведены расширенные производственные испытания в чугунолитейном производстве АО «АВТОВАЗ» при выплавке серого и высокопрочного чугунов в 40-т дуговых печах переменного тока карборунда фр.  $\varnothing$ 2,5 мм с содержанием карбида кремния 88-92%. Испытания показали более высокое усвоение расплавом чугуна карборунда уменьшенной фракции и с более низким содержанием кристаллической фазы  $\alpha$ -SiC. Данные параметры материала (фракция и содержание карбида кремния) приняты оптимальными и оформлены в качестве требований к производителю.

## Литература

- [1] Гринвуд Н. Химия элементов: в 2 томах. / Н. Гринвуд, А. Эрншо; пер. с англ. — М: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008, т. 1, 607 с.
- [2] Гасик, М.И. Выплавка стали в дуговых печах машиностроительного комплекса с заменой чугуна углеродкарбидкремниевыми брикетами [Текст] / М.И. Гасик, А.Н. Овчарук, И.В. Деревянко,
- [3] А.Д. Подольчук, А.В. Никонов, Н.Ф. Гимадеев, О.Н. Рахматулина, Н.П. Рябинкин // Электрометаллургия. — 2006. — №6. — С. 2—13

### **Structural and chemical features of silicon carbide and their influence on the specificity of its assimilation by molten cast iron**

Boldyrev D.A.<sup>1</sup>, Tokarev A.A.<sup>2</sup>, Kulakov B.A.<sup>3</sup>, Popova L.I.<sup>4</sup>, Prasolov S.G.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> JSC "AVTOVAZ Togliatti, Russia

<sup>2</sup> LLC "NPP" Technology Chelyabinsk, Russia

<sup>3</sup> SUSU, Chelyabinsk, Russia

<sup>4</sup> TSU, Togliatti, Russia

**Abstract.** When working out the technology of melting the melt of cast iron using silicon carbide a different degree of its assimilation is established both in general and separately for the main elements-carbon and silicon. Based on the results of diffraction and electron microscopic studies with x-ray spectral microanalysis, the real structural and chemical features of industrial silicon carbide are described. The phase composition of silicon carbide is inhomogeneous and consists of particles of crystalline silicon carbide  $\alpha$ -SiC and oxidized non-crystalline silicon carbide, which is based on a solid solution "carbon-silicon". Assimilation of silicon carbide by cast iron melt, determined by the growth of carbon and silicon in the smelting process, has an inverse relationship to the content of the  $\alpha$ -SiC phase.

Keywords: *silicon carbide, X-ray microanalysis, diffraction analysis*

УДК 621.74.01

### **Инновационные технологические решения в изготовлении отливок для тяжелого машиностроения ответственного назначения из высокопрочного чугуна**

Власенко Б.Б., Белов В.Д., Сидорюк А.Н., Лактионов С.В.

<sup>1</sup> «Электростальский завод тяжелого машиностроения» (ОАО «ЭЗТМ»),

Электросталь, Россия, <sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

eztm@eztm.ru

**Аннотация.** Описан опыт выполнения заказа на поставку прокатного оборудования для Кубы силами «Электростальского завода тяжелого машиностроения» (ОАО «ЭЗТМ») на примере изготовления пяти сложных литых деталей из ВЧ60 и ВЧ50. Высокие эксплуатационные свойства изделий достигнуты за счет уникальной технологии применения «мягкого холодильника» (формовочных смесей с повышенной теплоаккумулирующей способностью). С учетом большого количества деталей каждого чертежа эффект снижения затрат оказался существенным.

Ключевые слова: *чугунное литье, ВЧ60, ВЧ50, формовочные смеси*

«Электростальский завод тяжелого машиностроения» (ОАО «ЭЗТМ») – завод известный во многих странах мира как изготовитель металлургиче-