

Список источников

1. Расторгуев Д.А., Севастьянов А.А. Исследование твердого точения стали ХВГ // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2018. – № 4 (46). – С. 24–32.
2. Rastorguev D.A., Sevastyanov A.A. Neural network classification of surface quality after hard turning of 105WCr6 steel // 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 537 032056 doi:10.1088/1757-899X/537/3/032056.
3. Rastorguev D.A., Sevastyanov A.A. Diagnostics of chip formation and surface quality by parameters of the main drive current in the hard turning // 2019 Materials Today: Proceedings <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.025>.

УДК 669.131

ОБ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМАХ ПОЛУЧЕНИЯ И МОДИФИЦИРОВАНИЯ ГРАФИТИЗИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЧУГУНОВ

А.А. Токарев, Б.А. Кулаков

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Д.А. Болдырев, Л.И. Попова, С.Г. Прасолов

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти

Аннотация. Приведены и обсуждены наиболее актуальные проблемы получения графитизированных конструкционных чугунов – отсутствие системного исследования комбинированного и комплексного влияния ЦЗМ на эффективность графитизирующего модифицирования; получение механического аналога КЧ – высокопрочного чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом путём определения в нём соотношения перлит/феррит и шаровидный/вермикулярный графит; получение стабильной структуры ЧВГ путём оптимизации химического состава модификатора по содержанию четырех основных элементов (кремний, магний, редкоземельные металлы (РЗМ) и кальций); достижение благоприятной морфологии графита в микроструктуре заэвтектического СЧ за счёт разработки технологии графитизирующего модифицирования; стабилизация структуры и свойств отливок из СЧ и ВЧ поздним графитизирующим модифицированием литыми вставками; исследование влияния структуры и технологии получения модифицирующих материалов на качество чугуна в отливках из СЧ и ВЧ.

Ключевые слова: щёлочно-земельные металлы (ЩЗМ), ковкий чугун (КЧ), высокопрочный чугун (ВЧ) с шаровидным и вермикулярным графитом, чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ), заэвтектический серый чугун (СЧ), литая вставка, слиток, чипс

ON TOPICAL PROBLEMS OF OBTAINING AND MODIFYING GRAPHITIZED STRUCTURAL CAST IRONS

*A.A. Tokarev, B.A. Kulakov
South Ural State University, Chelyabinsk*

*D.A. Boldyrev, L.I. Popova, S.G. Prasolov
Togliatti State University, Togliatti*

Abstract. The most pressing problems of obtaining graphitized structural cast irons are presented and discussed – the absence of a systematic study of the combined and complex influence of alkaline earth metals on the efficiency of graphitizing modification; obtaining a mechanical analogue of ductile iron – high-strength cast iron with spheroidal and vermicular graphite by determining the ratio of pearlite/ferrite and nodular/vermicular graphite in it; obtaining a stable structure of CGI by optimizing the chemical composition of the modifier in terms of the content of 4 basic elements (Si, Mg, rare earth metals and Ca); achievement of favorable morphology of graphite in the microstructure of hypereutectic gray cast iron due to the development of the technology of graphitizing modification; stabilization of the structure and properties of gray and ductile iron castings by late graphitizing modification with cast inserts; investigation of the influence of the structure and technology of obtaining modifying materials on the quality of cast iron in castings from gray and ductile iron.

Keywords: alkaline earth metals, malleable cast iron, ductile cast iron with spheroidal and vermicular graphite, cast iron with vermicular graphite, hypereutectic gray cast iron, cast insert, ingot, chips

На сегодняшний день можно выделить шесть проблемно-ориентированных направлений при получении графитизированных конструкционных чугунов.

1. Исследование совместного влияния ЩЗМ на эффективность графитизирующего модифицирования ферросилициевого модификатора. Наиболее употребимые составы графитизирующих модификаторов изготавливаются на основе ферросилиция (ФС) с содержанием кремния 65–80 % при введении нескольких процентов одного или нескольких ЩЗМ: кальция, бария и стронция. Из производ-

ственной практики известна их сравнительная графитизирующая способность, на основе которой их правомочно расположить в следующий ряд: Ba > Sr > Ca.

Однако до сих пор системно не исследована эффективность как комбинированного, так и комплексного влияния данных ШЗМ на процесс графитизации и уровень литейных дефектов в СЧ: не проведена их оптимизация в части подбора фактического содержания и соотношений при всех возможных вариантах применения: в парах Ca/Sr, Ca/Ba и Ba/Sr и триплекса Ca/Ba/Sr.

При назначении фактического содержания ШЗМ в модификаторе для обработки расплава чугуна, предназначенного для отливок определённой массы, габаритов и требований к структуре и свойствам, наиболее правильным и целесообразным представляется нахождение эквивалентных коэффициентов усиления графитизирующего влияния в парах Ca/Sr, Ca/Ba и Ba/Sr и комплексе Ca/Ba/Sr: принимая в вариантах Ca/αSr, Ca/βBa и Ca/γSr/δBa влияние кальция (как наиболее слабого по сравнению с барием и стронцием) за 1, а в паре Sr/φBa – влияние стронция за 1.

В результате эквиваленты элементов выразятся следующими соотношениями:

- кальций-стронциевый эквивалент $\Theta_{Ca-Sr} = Ca + \alpha Sr$;
- кальций-бариевый эквивалент $\Theta_{Ca-Ba} = Ca + \beta Ba$;
- стронций-бариевый эквивалент $\Theta_{Sr-Ba} = Sr + \phi Ba$;
- кальций-стронций-бариевый эквивалент $\Theta_{Ca-Sr-Ba} = Ca + \gamma Sr + \delta Ba$.

Необходимо иметь в виду, что коэффициенты α и β перед Sr и Ba соответственно в парах Ca/αSr, Ca/βBa, а также γ и δ в комплексе Ca/γSr/δBa неравнозначны, т. е. α ≠ γ и β ≠ δ, так как не учитывают комплексное взаимовлияние всех трех ШЗМ.

Данные эквиваленты применимы при выполнении следующих граничных условий:

- а) фракционный состав (диапазон) постоянный (const);
- б) содержание кремния постоянное;
- в) способ ввода (под струю единой порцией, на струю при наполнении из печи, на струю при наполнении литейной формы и др.) постоянный.

В общем случае производственный критерий графитизирующего модификатора можно задать в параметрической форме как $f(\text{Si}; \text{Ca}; \text{Ba}; \text{Sr}; \text{фракционный состав (диапазон)})$.

2. Исследование технологических возможностей и обеспечение получения ВЧ с вермикулярным графитом, идентичного КЧ. Ковкий чугун, долгое время с успехом использовавшийся для средне- и тяжёлонагруженных деталей в машино- и автомобилестроении, в производстве продукции железнодорожного назначения и сельхозоборудования [1], в последствии был практически полностью вытеснен высокопрочным чугуном с шаровидным графитом (ВЧШГ). Исключение составили мелкие и/или тонкостенные отливки с толщиной стенки до 3 мм, тогда как отливки из ВЧ изготавливаются с минимальной толщиной стенки 6 мм.

При сравнении линейки марок КЧ (ГОСТ 1215) и ВЧШГ (ГОСТ 7293) очевидно, что хлопьевидный графит является несколько более сильным концентратором напряжений по сравнению с глобулярным графитом, в результате прочностные и пластические свойства КЧ ниже, чем у ВЧШГ. При этом технологически получение заготовок из КЧ является более дорогим процессом, чем получение отливок из ВЧШГ. Здесь энерго- и трудоёмкость технологии получения КЧ существенно превалирует над материалоёмкостью технологии получения ВЧ.

Долгое время в чугунолитейном производстве стереотипно считалось, что высокопрочный чугун при содержании в его структуре вермикулярного графита более 20 % является однозначным браком. Не рассматривалось и не изучалось влияние изменения содержания вермикулярного графита в диапазоне от 20 до 60 % на прочностные и пластические характеристики чугуна. Однако в современных условиях, когда на практике реализуется более рациональный подход к закладыванию свойств сплава для конкретной детали или группы деталей на основе применения математического моделирования, возникает необходимость в сплавах с комбинированным сочетанием свойств.

Его может обеспечить так называемый высокопрочный чугун с шаровидным и вермикулярным графитом (ВЧШВГ), который по своей сути в части микроструктуры является гибридным чугуном.

По соотношению шаровидного и вермикулярного графита он не может быть строго отнесён к ВЧШГ ввиду содержания вермикулярного графита более 20 %, но и не является чугуном с вермикулярным графитом (ЧВГ), так как содержание в нём вермикулярного графита менее 60 %.

Новый рациональный подход к использованию данного типа чугуна реализуется не только в нашей стране. Например, по информации из доклада и презентации (слайд 19) специалистов одной японской компании, специализирующейся на производстве материалов для внепечной обработки чугуна, именно такой тип чугуна без пластинчатого графита и с содержанием вермикулярного графита 20–60 % называется «ВЧ/ЧВГ» [2] и имеет определённое распространение в Японии.

Из отечественных предприятий отливки из данного типа чугуна изготавливает Автомобильный завод «УРАЛ». Наименование материала в технической документации предприятия – ВЧ40-50.

В отечественной практике данный тип чугуна нашёл своё применение, в частности, в чугунолитейном производстве АО «АВТО-ВАЗ» для средненагруженных (в том числе и термонагруженных) деталей шасси и двигателя автомобиля, таких как:

- коллектор выпускной;
- картер редуктора заднего моста;
- крышка подшипника дифференциала заднего моста;
- кронштейн правой опоры подвески двигателя (как 8-, так и 16-клапанного);
- кронштейн крепления заднего тормоза;
- кронштейн левой опоры подвески двигателя.

В качестве примера приведём для двух последних отливок фактические данные по механическим свойствам ВЧШВГ (табл. 1), полученные при его паспортизации (рис. 1, 2).

Анализ фактических механических свойств ВЧШВГ и близких марок ЧВГ и КЧ показывает, что по прочности он соответствует марке ЧВГ40 ($\sigma_b \geq 400$ МПа), однако имеет более высокое относительное удлинение $\delta \geq 4$ %, свойственное марке КЧ50-4 (табл. 2).

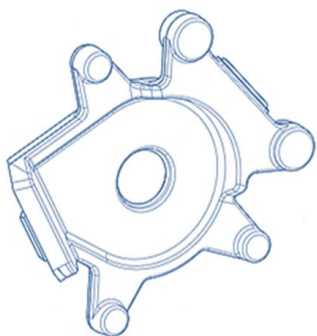


Рис. 1. Кронштейн крепления заднего тормоза



Рис. 2. Кронштейн левой опоры подвески двигателя

Таблица 1

Механические свойства

№ п/п	σ_B , МПа	δ , %
<i>Кронштейн крепления заднего тормоза</i>		
1	520	5
2	446	4
3	481	5
4	413	4
5	420	4,5
<i>Кронштейн левой опоры подвески двигателя</i>		
1	451	4

Таблица 2

Сопоставление механических свойств

Марка чугуна	σ_B , МПа, не менее	δ , %, не менее
ЧВГ40	400	1
ВЧШВГ		4
КЧ50-4	491	

Таким образом, рассматриваемый тип чугуна – ВЧШВГ – имеет рациональное применение для определённой ниши деталей машиностроения, и в будущем либо он должен быть внесён в переработанный ГОСТ 28394–89 на ЧВГ, либо на него должен быть разработан собственный автономный стандарт.

3. Повышение стабильности технологии получения ЧВГ путем управления параметрами модификатора. В настоящее время до сих пор не решена проблема получения стабильной структуры ЧВГ. Её наиболее состоятельное решение состоит в оптимизации расхода и состава модификатора для получения ЧВГ по содержанию четырех наиболее значимых элементов: кремния, магния, кальция и редкоземельных металлов (рис. 3) – под конкретную производственную технологию его получения (залвка сверху, сэндвич-процесс, ковш с крышкой, проволока с наполнителем и др.), учитывая, как уже отмечалось выше, некорректность использования понятия «универсального» состава модификатора. Особенную сложность представляет решение данной задачи под технологию «залвка сверху» как наиболее чувствительной к исполнительскому фактору. В общем случае его можно сформулировать следующим образом: установление исключаяющей размыв величины ковшовой навески модификатора оптимального фракционного состава (диапазона) и содержания Si, Mg, Ca и РЗМ.

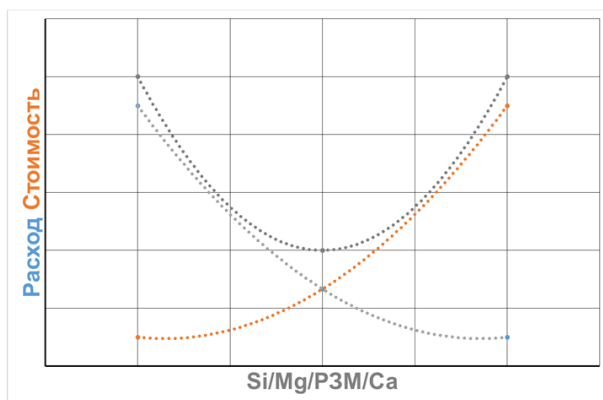


Рис. 3. Феноменологическая зависимость расхода/стоимости модификатора для получения ЧВГ от содержания его основных элементов

4. Исследование особенностей графитизирующего модифицирования заэвтектического СЧ и разработка его технологической схемы.

Процесс графитообразования и его особенности при кристаллизации доэвтектических СЧ (при степени эвтектичности $S_e < 1$) изучен достаточно подробно. Данный тип чугунов достаточно хорошо восприимчив к графитизирующему модифицированию, то есть в нём при относительно невысоком расходе графитизирующего модификатора ($\leq 0,3$ % при ковшовом модифицировании способом «под струю единой порцией») может быть сформирована структура графита со следующими характеристиками, общепризнанная как наиболее благоприятная: ПГф1 – ПГр1 – ПГд(45–180) – ПГ(6–10) (рис. 4).

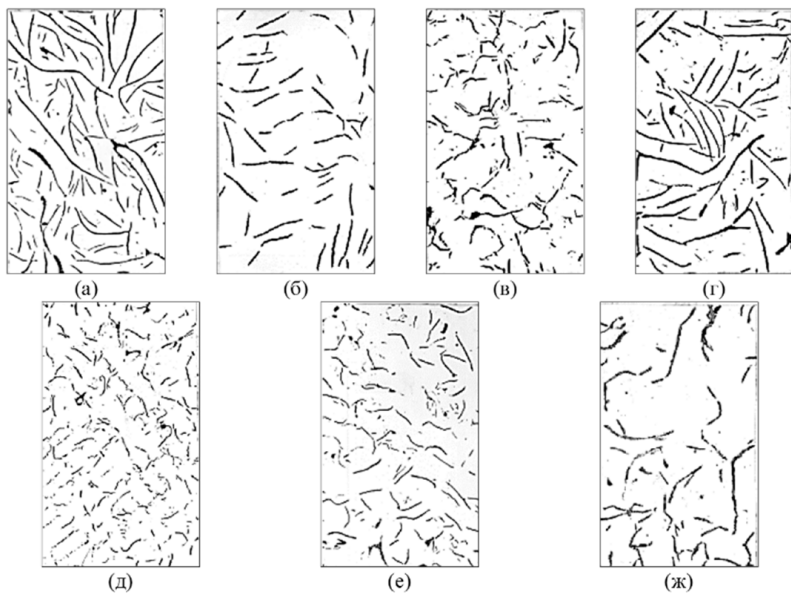


Рис. 4. Графитные включения в доэвтектическом сером чугуне:
a – типичная форма; *b* – распределение; *c, d* – количество;
e, z, ж – размеры

Процесс графитообразования доэвтектических СЧ довольно легко управляем, и для получения вышеуказанной структуры вполне достаточно одностадийного ковшового графитизирующего модифицирования. Фото реальных структур графита приведены на рис. 5.

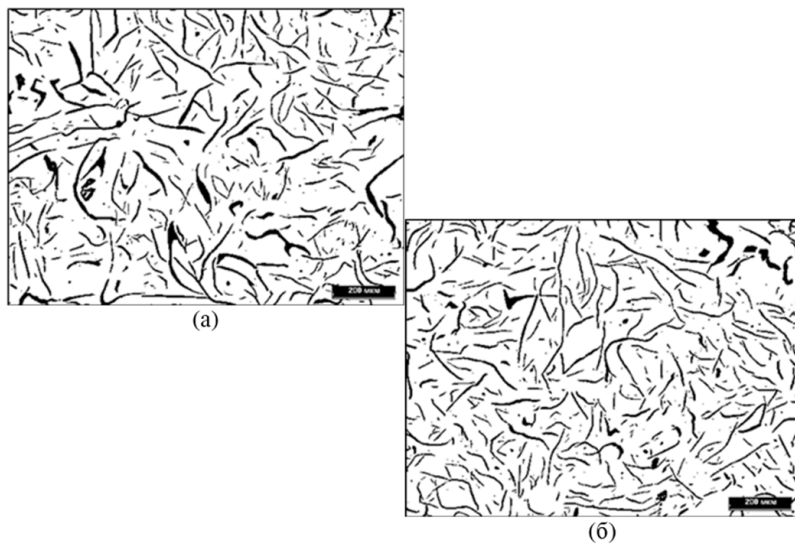


Рис. 5. Типичные структуры графита в доэвтектическом СЧ

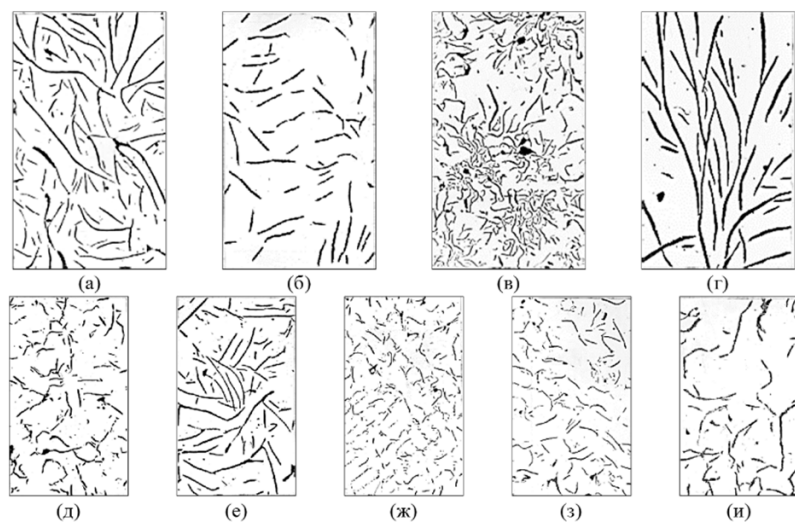


Рис. 6. Графитные включения в заэвтектическом сером чугуна:
a – типичная форма; *б, в, г* – распределение; *д, е* – количество;
ж, з, и – размеры

При кристаллизации заэвтектических СЧ (при степени эвтектичности $S_e > 1$) процесс графитообразования является более сложным, так как хуже управляется графитизирующим модифицированием: структура графита, аналогичная доэвтектическим СЧ, при его одностадийной ковшовой графитизирующей обработке не достигается и имеет следующие отличия: ПГф1,2 – ПГр1,3,5 – ПГд(45–350) – ПГ(10–12) (рис. 6).

То есть наряду с пластинчатой прямолинейной появляется также завихрённая форма, к равномерному распределению добавляются как колонии пластинчатого графита, так и его веточное распределение, а также увеличивается диапазон длин графитных включений в сторону их удлинения. На рис. 7 приведены фото наиболее характерных микроструктур заэвтектического СЧ.

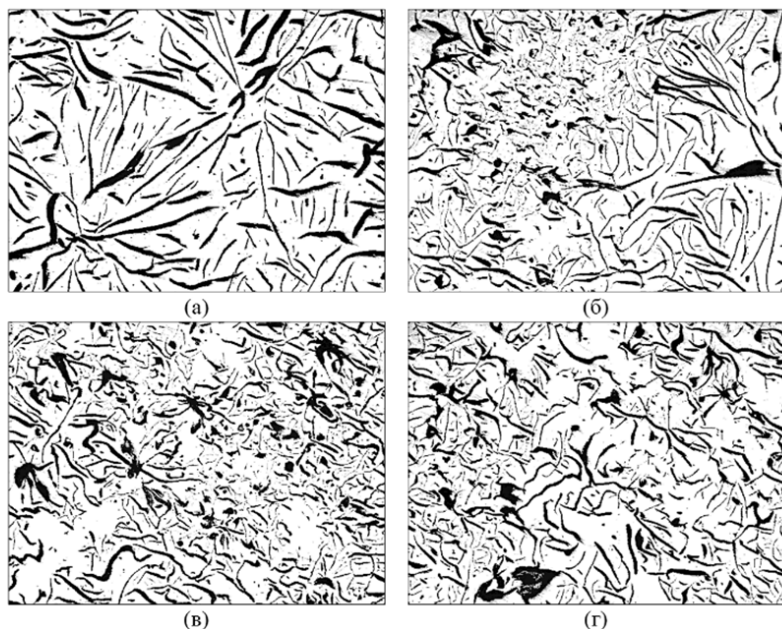


Рис. 7. Типичные структуры графита в заэвтектическом СЧ

Такое качественное различие в микроструктуре графита объясняется особенностями кристаллизации до- и заэвтектического СЧ. При кристаллизации доэвтектического СЧ инициация гра-

фитообразования происходит после и за счёт введения графитизирующего модификатора, создающего центры кристаллизации графита (ЦКГ) в локально пересыщенных кремнием квазиэвтектических зонах. Достаточное количество графитизирующего модификатора с определённым набором активных элементов (барий, кальций, стронций) полностью снимает переохлаждение расплава чугуна и позволяет сформировать равномерное распределение ПГр1 прямолинейных графитных включений ПГф1 средней длины (90–180 мкм).

Качественное отличие процесса кристаллизации заэвтектического СЧ состоит в изначальном выделении из расплава первичного графита, морфологию которого в первую очередь и формирует введённый затем графитизирующий модификатор. Первичный графит после графитизирующей обработки расплава чугуна в ковше представляет собой прямолинейные пластины ПГф1 с равномерным ПГр1 и/или веточным ПГр5 распределением. Однако графитизирующий эффект от первичного модифицирования для создания благоприятной структуры графита при эвтектическом превращении и более низких температурах, аналогичной структуре доэвтектического СЧ, оказывается недостаточным, в результате в поздние кристаллизующихся областях формируются колонии ПГр3. Следовательно, процесс равномерного структурообразования графита после эвтектического превращения нарушается, о чём свидетельствует его скучковывание и сгущение в виде колоний ПГр3, то есть процесс становится малоуправляемым.

Таким образом, в отличие от доэвтектического СЧ, не обеспечивается качественное инокулирование заэвтектического СЧ при одностадийном ковшовом модифицировании: в этом случае модифицируется только первичный графит. Достижение благоприятной структуры заэвтектического СЧ возможно за счёт пролонгации инокулирующего эффекта при ковшовом модифицировании либо за счёт введения второй стадии графитизирующей обработки (домодифицирования).

5. Стабилизация структуры и свойств отливок из СЧ и ВЧ поздним графитизирующим модифицированием литыми вставками. Наиболее технологически удобным, простым и рациональным процессом

является вторичное (позднее) графитизирующее модифицирование ВЧ кусковым ферросилицием, как правило марки ФС75. Кусок, имеющий фиксированную массу (рис. 8), которая зависит от металлоёмкости литейной формы (~0,2 %), укладывают в заливочную чашу перед разливкой расплава чугуна из ковша. В настоящее время единственным предприятием, использующим данную технологическую схему вторичного (позднего) графитизирующего модифицирования ВЧ, является АО «АВТОВАЗ». Отечественные ферросплавные заводы, изготавливающие ферросилиций по ГОСТ 1415–93, отказываются осуществлять поставки своей продукции с весовым нормированием куска, главным образом, из-за низкой рентабельности и экономической неэффективности.



Рис. 8. Кусковой ферросилиций



Рис. 9. Внутриформенная литая вставка

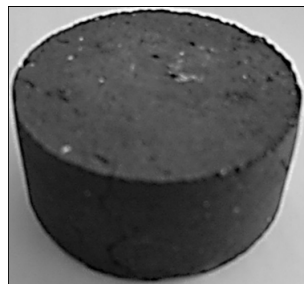


Рис. 10. Прессованный брикет для модифицирования в чаше формы

В настоящее время на подавляющем большинстве зарубежных чугунолитейных предприятий широкое использование получила технология позднего (вторичного) графитизирующего модифицирования расплава ВЧ на струю (MSI-process), считающаяся наиболее прогрессивной. В меньшей степени распространена технология модифицирования вставками с размещением внутри формы на фильтре или без него, в заливочной чаше формы (рис. 9, 10). Однако в отечественной практике чугунолитейных производств данные технологические процессы внедрены ещё далеко не повсеместно, что обусловлено в первом случае высокой стоимостью оборудования для графитизирующего модифицирования на струю (дозато-

ров), а во втором – нестабильностью растворения прессованных брикетов и вставок из отсевов графитизирующих модификаторов на основе ФС65, ФС75 (рис. 10) и отсутствием исследований влияния особенностей структуры литой быстроохлаждённой вставки (размер, форма, распределение структурных составляющих) на структуру, свойства и дефекты литейного происхождения получаемых чугунных отливок.

6. Исследование влияния структуры и технологии получения модифицирующих материалов на качество чугуна в отливках из СЧ и ВЧ. В мировой практике для выплавки модификаторов и лигатур используются следующие две металлургические технологии: рудотермический процесс с полным циклом и финишной обеспыливающей обработкой после дробления и фракционирования (рассева) (I) и упрощённый процесс – вторичный переплав (II). Существуют также две технологии разливки: в слиток с кристаллизацией в изложнице (I) (рис. 11) и в «чипс» при непрерывной разливке с кристаллизацией на водоохлаждаемом стальном барабане (II) (рис. 12). Однако отсутствуют результаты системных исследований влияния технологий выплавки и разливки модифицирующих материалов на их качество (наличие окисленных фаз, несплошностей, пор, особенностей морфологии фаз) для прогнозирования эффективности внепечной обработки чугуна.



Рис. 11. Слиточный модификатор



Рис. 12. Чипс-модификатор

Список источников

1. *Металлургия. Metalловедение и конструкционные материалы* / Б.А. Кузьмин [и др.]. – М. : Высшая школа, 1977. – С. 190.
2. *Детали машиностроения из чугуна с вермикулярным графитом: свойства, технология, контроль : тезисы докладов МНТК (Набережные Челны, 17–18 октября 2017 г.)* / под ред. А.Г. Панова. – Казань : Изд-во Казан. ун-та, 2017. – 97 с.