

М. А. Фесенко, В. А. Косячков, А. Н. Фесенко\*, И. В. Лукьяненко, Е. В. Фесенко

Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

\*Донбасская государственная машиностроительная академия, Краматорск

## Графитизирующее модифицирование чугуна в литейной форме

Исследован процесс внутриформенного графитизирующего модифицирования исходного чугуна, склонного к кристаллизации по метастабильной системе с отбелом дроблёными добавками ферросилиция марки ФС75 фракций до 1,0 мм (включая пылевидную), 1,0...2,5, 2,5...5,0 и 5,0...10,0 мм. Установлено, что оптимальные результаты внутриформенного графитизирующего модифицирования, обеспечивающие полное устранение отбела в отливках даже в тонком их сечении (3 мм), достигаются при использовании ферросилиция с размерами зёрен 1,0...5,0 мм. Такая фракция ферросилиция допускает фильтрацию жидкого чугуна в промежутках между зёрнами модификатора на определённую глубину в реакционной камере и обеспечивает относительно равномерное растворение зёрен в потоке чугуна в соответствии с наиболее эффективным послойным механизмом взаимодействия частиц модификатора с расплавом.

**Ключевые слова:** внутриформенное модифицирование, графитизирующий модификатор, дроблёная добавка, реакционная камера, ферросилиций, белый чугун, структура чугуна

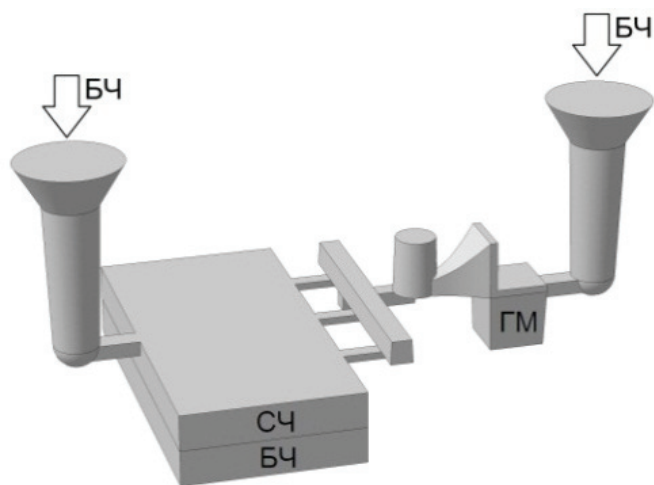
**В**ведение. Предлагается оригинальный способ производства двухслойных отливок с дифференцированной структурой и свойствами, который заключается в заливке общей литейной формы белым чугуном, склонным к кристаллизации по метастабильной системе с образованием ледебуритной эвтектики в рабочем слое, размещённом в нижней части отливки (БЧ). А после определённой паузы, необходимой для образования твёрдой корки между двумя слоями, доливке верхней крепёжной части отливки через независимую литниковую систему с реакционной камерой, заполненной графитизирующим модификатором (ГМ) (рис. 1).

При отработке данного способа первоначально возникла необходимость в выборе заряда реакционной камеры для обеспечения эффективного графитизирующего модифицирования исходного белого чугуна в литейной форме.

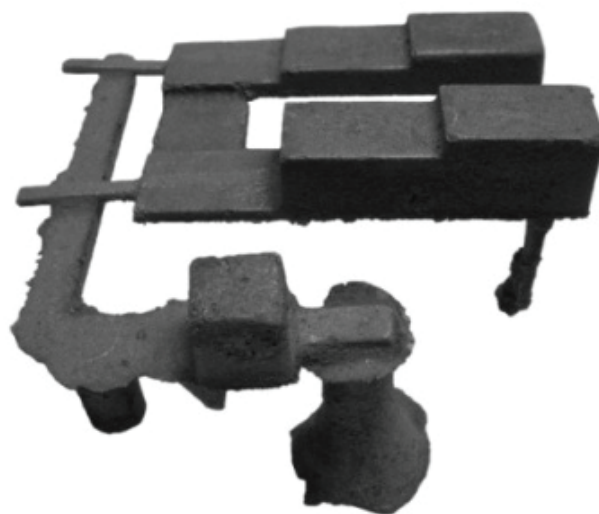
**Материалы и методы.** Задачу выбора оптимального гранулометрического состава графитизирующего заряда реакционной камеры и условий его растворения при заливке решали путём изготовления экспериментальных отливок типа сдвоенных ступенчатых проб массой  $5,0 \pm 0,2$  кг с сечением стенок 3, 5, 10, 20, 30, 40, 50 мм и литниковой системой, которая включала кубическую реакционную камеру размером  $40 \times 40 \times 40$  мм (рис. 2).

Графитизирующее модифицирование в литейной форме исходного чугуна, склонного к кристаллизации с отбелом, проводили ферросилицием марки ФС75 (ДСТУ 4127 - 2002). Количество заряда в реакционной камере составляла 2,0 % от массы отливки (100 г). То есть реакционная камера содержала 1,5 % кремния от массы отливки.

Для выбора оптимального гранулометрического состава заряда реакционных камер кусковой



**Рис. 1.** Схема способа получения двухслойных отливок: БЧ – белый чугун, СЧ – серый чугун, ГМ – графитизирующий модификатор



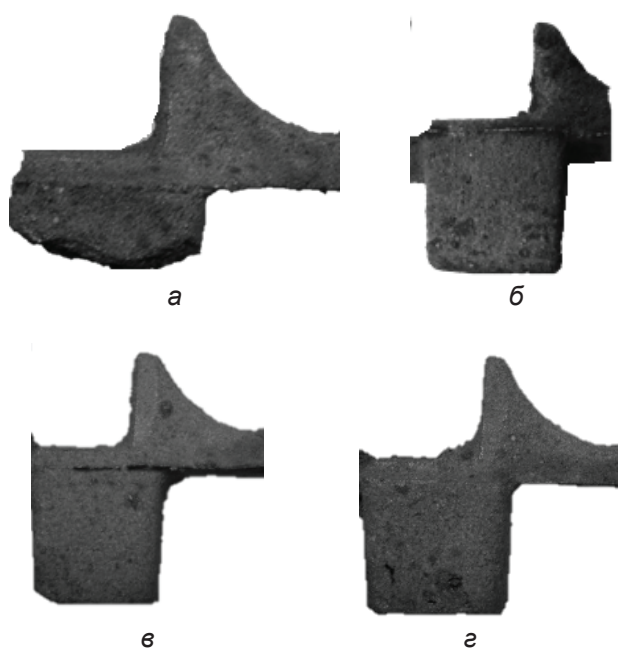
**Рис. 2.** Сдвоенная ступенчатая проба с литниково-модифицирующей системой

ферросилиций дробили в щёковой дробилке и с помощью набора сит рассеивали на фракции до 1,0 мм (включая пылевидную), 1,0...2,5, 2,5...5,0 и 5,0...10,0 мм.

Шихту, состоящую из первичного передельного чугуна (70 %) и стального лома (30 %), выплавляли в индукционной печи ИСТ-006. Перед разливкой чугуна с помощью прибора для экспресс-контроля по кривым охлаждения измеряли углеродный эквивалент ( $C_e = C + Si/3$ ) исходного чугуна, который должен быть находиться в диапазоне  $C_e = 2,8...3,0$ .

Сухие песчано-глинистые формы заливали открытым ручным ковшем в течение  $5 \pm 2$  с. Температуру заливаемого чугуна контролировали погружением под зеркало металла в ковше вольфрам-рениевой термопарой с защитным кварцевым наконечником в диапазоне 1450...1480 °С.

Во время выбивки форм особое внимание уделяли внешнему виду реакционных камер (рис. 3).

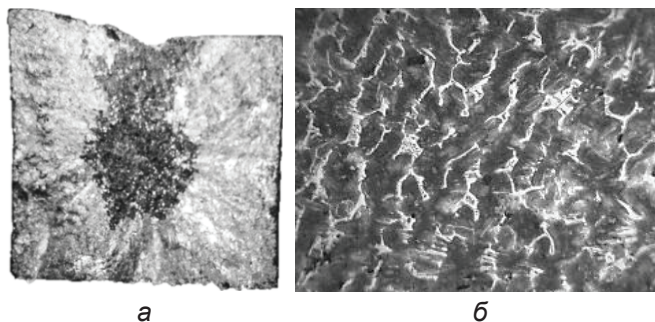


**Рис. 3.** Отливки реакционных камер после модифицирования ферросилицием ФС75 фракциями до 1,0 мм (включая пылевидную) (а), 1,0...2,5 мм (б), 2,5...5,0 мм (в) и 5,0...10,0 мм (з)

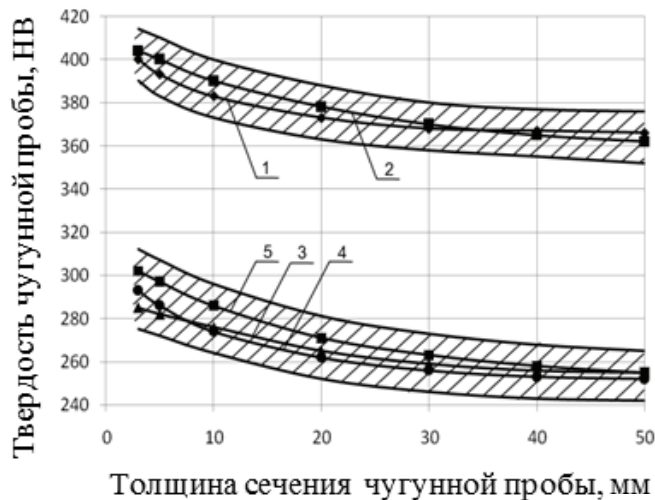
В частности, на дне камеры с ферросилицием фракции до 1,0 мм (включая пылевидную) наблюдались остатки, которые не успели раствориться в потоке исходного жидкого чугуна при заливке форм (рис. 3, а).

Цвет излома чугуна во всех сечениях проб после модифицирования ферросилицием фракции до 1,0 мм (включая пылевидную) оставался, как и в исходном блестящим светло-кристаллическим (рис. 4, а). Микроструктура образцов, вырезанных из отливки, состояла из цементита и продуктов распада аустенита (рис. 4, б).

Твёрдость исходного и модифицированного ферросилицием фракции до 1,0 мм (включая пылевидную) чугуна в сечениях ступенчатых проб 3...50 мм плавно уменьшалась от  $400 \pm 20$  до  $360 \pm 20$  НВ (рис. 5, кривая 1, 2) за счёт частичной графитизации ледебуритной эвтектики на базе карбидов  $Fe_3C$  и продуктов распада аустенита.



**Рис. 4.** Блестящий светло-кристаллический цвет излома (а) и микроструктура (б) белого чугуна в сечении пробы 50 мм, модифицированного ферросилицием фракции до 1,0 мм (включая пылевидную),  $\times 100$



**Рис. 5.** Твёрдость исходного (1) и модифицированного чугуна ферросилицием ФС75 фракциями до 1,0 мм (2), 1,0...2,5 мм (3), 2,5...5,0 мм (4) и 5,0...10,0 мм (5).

По физическим свойствам такой мелкодисперсный заряд реакционной камеры подобен неуплотнённому брикету, который исключает возможность проникновения чугуна между зёрнами модификатора. Несмотря на высокую суммарную реакционную поверхность мелких частиц, их эффективная поверхность контакта с чугуном приближается к площади горизонтального сечения реакционной камеры. В условиях эксперимента площадь составляла 16 см<sup>2</sup>. Период прогрева до температуры плавления подобного порошкового брикета соответствует или превышает продолжительность заливки самой формы.

Поэтому основная масса мелкодисперсного модификатора после охлаждения отливки и выбивки его из формы остаётся в камере в первоначальном состоянии.

Реакционные камеры отливок с ферросилицием фракций 1,0...2,5 и 2,5...5,0 мм имели чёткую кубическую форму без остатков модификатора, что свидетельствовало о полном растворении зарядов камер в течение  $5 \pm 2$  с заливки формы (рис. 3, б, в). Реакционная камера отливки с фракцией 5,0...10,0 мм имела также чёткую кубическую форму, только на дне реакционной камеры наблюдались остатки частиц модификаторов, которые не успели раствориться потоком чугуна за время заливки формы (рис. 3, з).

Гранулы ферросилиция размером 1,0...2,5 и 2,5...5,0 мм без мелких и пылевидных частиц допускают фильтрацию жидкого металла в промежутках между зёрнами модификатора на определённую глубину. Интенсивный теплообмен между твёрдой и жидкой фазами, достаточная суммарная площадь реакционной поверхности и синхронизация скорости заливки формы со скоростью продвижения в камере двухфазного твёрдо-жидкого реакционного слоя сверху вниз обеспечивают в комплексе относительно равномерное растворение зёрен в потоке чугуна. При этом во всех сечениях ступенчатых проб, даже в тонком сечении (3 мм), чугун кристаллизовался с тёмно-серым изломом (рис. 6, а), что подтверждает полное устранение отбела.

Структура образцов, вырезанных из ступенчатых проб, состояла из графита пластинчатой формы (с баллом ПГф2, ПГд25, ПГр6, ПГ10) в перлитной металлической матрице (П96Ф4) (рис. 6, б).

Гранулы ферросилиция размером 5,0...10,0 мм допускают межзёрненную фильтрацию жидкого металла по всему объёму реакционной камеры в течение заливки формы и устраняют отбел во всех сечениях пробы. Однако в основной своей массе относительно большие куски ферросилиция размером 10,0 мм не успевают полностью прореагировать с чугуном и после окончания заливки форм спекаются с остатками жидкого металла в реакционной камере. Внутриформенное модифицирование чугуна добавками ферросилиция размерами 10,0 мм не даёт стабильных результатов и приводит к перерасходу ферросилиция.

Твёрдость чугуна, модифицированного ферросилицием фракциями 1,0...2,5, 2,5...5,0 и 5,0...10 мм с увеличением толщины сечения пробы от 3 до 50 мм также плавно снижалась от  $290 \pm 20$  до  $260 \pm 20$  НВ (рис. 5, кривые 3, 4, 5).

Химическим анализом установлено, что исходный чугун в образцах, вырезанных из экспериментальных отливок содержит 2,85 % С и 0,48 % Si. Таким образом, в случае 100 % усвоения ферро-

силиция марки ФС75 содержание кремния должно увеличиться до 1,98 %.

Содержание кремния в модифицированном ферросилицием чугуна фракции 1,0...5,0 мм увеличилось до 0,9 %. Такое количество обеспечивает полное устранение карбидов железа в микроструктуре чугуна после модифицирования.

Содержание кремния в чугуна, модифицированном ферросилицием фракции 5,0...10,0 мм, по сравнению с исходным чугуном увеличилось до 0,55 %. Но даже такое количество кремния способствует кристаллизации чугуна в литейной форме по стабильной системе диаграммы «железо-углерод» без отбела.

Результаты эксперимента подтверждают высказывание ещё в середине прошлого столетия А. Е. Кривошеевым [3] о том, что при модифицировании в форме ферросилицием даже незначительное усвоение кремния потоком жидкого металла обеспечивает подавление склонности чугуна к кристаллизации с отбелом, даже если абсолютный прирост содержания кремния в модифицированном чугуна меньше стандартной (ГОСТ 12346-66) погрешности соляно- и азотнокислотного метода определения содержания кремния в железоуглеродистых сплавах  $\pm 0,05$  %. Абсолютный прирост содержания кремния в чугуна, модифицированном ферросилицием фракции 5,0...10,0 мм, составил  $0,55 - 0,48 = 0,07$  %.

Зависимость степени усвоения металлом отливки модификатора от его зернистости можно объяснить различными механизмами межфазного взаимодействия жидкого чугуна с частицами модификатора в реакционной камере литниковой системы.

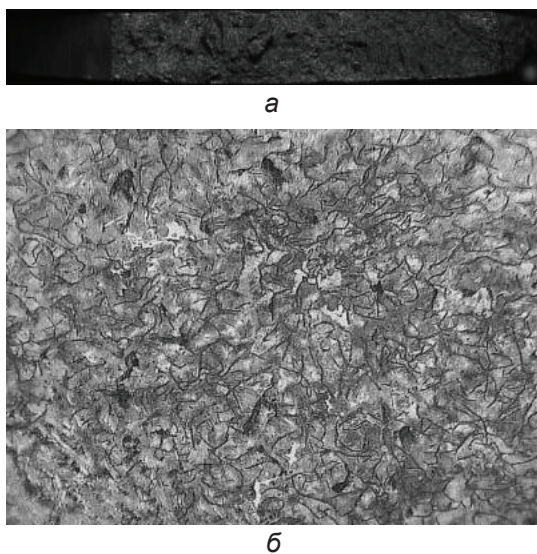
В своё время на основании теоретических исследований экспериментальными косвенными термографическими методами изменения теплового режима в проточной реакционной камере, порционного разделения модифицированного жидкого чугуна в реакционной камере и комбинированным методом порционного разделения с термографированием теплового режима при засыпке модификатора автором работ [4-7] установлены следующие возможные механизмы взаимодействия твёрдой и жидкой фаз в реакционной камере: поверхностный, послойный, объёмный и комбинированный.

Для наглядного определения причины существенной зависимости результатов модифицирования от зернистости ферросилиция методом физического моделирования дополнительно выполнили эксперимент на прозрачных моделях.

Из прозрачного оргстекла изготовили модель отливки типа вертикальной плиты с литниковой системой и реакционной камерой [8].

В качестве веществ, моделирующих модификатор и жидкий чугун, использовали древесные опилки и проточную воду. Древесные опилки распределяли на три фракции: мелкодисперсную пылевидную с размером частиц до 1,0 мм (включая пылевидную), 1,0...5,0 и 5,0...10,0 мм.

Процесс гидравлического взаимодействия опилок с потоком проточной воды в прозрачной реакционной камере при заливке прозрачной модели отливки фиксировали цифровой видеокамерой.



**Рис. 6.** Тёмно-серый цвет излома (а) и микроструктура чугуна (б), модифицированного в литейной форме сплавом ФС75 фракциями 1,0...2,5, 2,5...5,0 и 5,0...10 мм в сечении пробы 3 мм,  $\times 100$

Отснятые кадры свидетельствовали, что мелко-дисперсные твёрдые частицы опилок размером до 1,0 мм, включая пылевидную фракцию, контактируют и взаимодействуют с потоком жидкости только в поверхностном слое заряда реакционной камеры (рис. 7, а). В течение всего периода заливки до завершения заполнения формы жидкость медленно просачивается сквозь верхний слой засыпки.

На завершающем этапе заливки глубина слоя влажных опилок в среднем сечении реакционной камеры не превышает 10 % высоты засыпки и только в месте поступления жидкости в камеру под питателем увеличивается до 20 %. При этом частицы опилок не захватываются потоком жидкости и не направляются в полость формы. После полного завершения заливки модели отливки 80...90 % твёрдой фазы остаётся в реакционной камере в сухом состоянии (рис. 7, а).

Таким образом, в данном случае межфазное взаимодействие твёрдой и жидкой фаз происходит преимущественно по поверхности модифицирующего заряда реакционной камеры, то есть по менее эффективному поверхностному механизму (рис. 7, а)

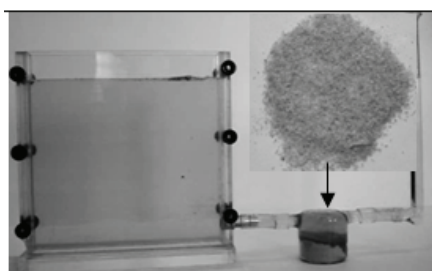
По кинограмме моделирования на прозрачных моделях взаимодействия потока воды с древесными опилками размером частиц 1,0...5,0 мм установили,

что жидкость быстро проникает в глубину заряда, распространяясь в реакционной камере от поверхностного слоя и стенок внутрь и вниз.

К началу поступления расплава из реакционной камеры в полость прозрачной модели формы фронт продвижения жидкости сверху вниз уже достигает 1/3 высоты засыпки. Жидкость полностью проникает на всю глубину заряда камеры, распространяясь в порах между частицами опилок, при заполнении модели формы на 50 % её высоты. С поверхностного слоя засыпки наблюдается активный захват частиц опилок потоком жидкости и их переход в модель формы. После завершения заливки модели формы около половины заряда остаётся в реакционной камере, однако другая половина заряда захватывается жидкостью и направляется в полость модели литейной формы (рис. 7, б). В данном случае наблюдается межфазное взаимодействие жидкости с древесными опилками в соответствии с послойным механизмом (рис. 7, д).

Так что с точки зрения гидродинамики послойный механизм взаимодействия твёрдой и жидкой фаз в реакционной камере литейной формы (рис. 7, б, д) значительно эффективнее, чем поверхностный.

При моделировании заряда реакционной камеры крупнозернистыми древесными опилками фракции



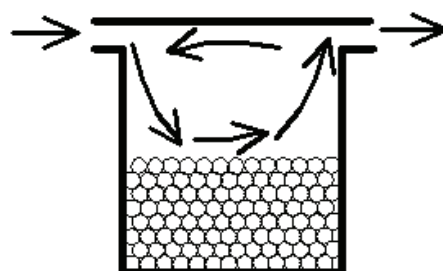
Размер частиц до 1,0 мм  
а



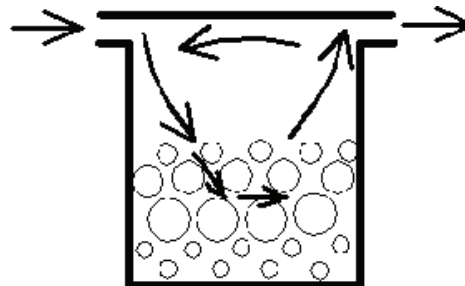
Размер частиц 1,0...5,0 мм  
б



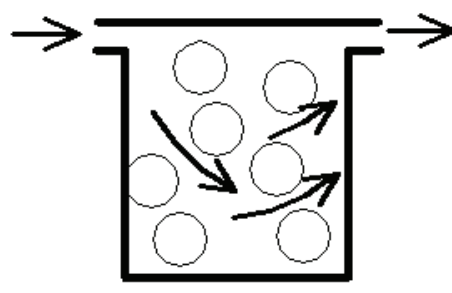
Размер частиц 5,0...10,0 мм  
в



Поверхностный механизм взаимодействия  
г



Послойный механизм взаимодействия  
д



Объёмный механизм взаимодействия  
е

**Рис. 7.** Конечные кадры видеосъёмки процесса физического моделирования взаимодействия жидкой и твёрдой фаз в прозрачной реакционной камере и полости формы (а, б, в) и схематический механизм взаимодействия частиц заряда камеры различного гранулометрического состава с потоком жидкости (г, д, е)

5...10 мм практически сразу после начала заливки вода проникает в зазоры между частицами опилок, образуя ещё до момента полного заполнения реакционной камеры однородную смесь жидкости и твёрдых частиц. При этом вместо поверхностного или послойного механизма взаимодействия твёрдой и жидкой фазы в реакционной камере наблюдается объёмный механизм взаимодействия (рис. 7, в, е).

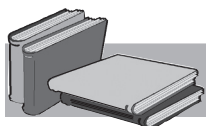
С начала поступления жидкости в полость литейной формы поток подхватывает отдельные частицы опилок. Относительно крупные частицы заряда камеры, размер которых сравним с линейным размером сечения питателя, накапливаются у выходного отверстия реакционной камеры, закупоривают отверстие и выполняют функцию фильтра, который задерживает подхваченные жидкостью другие твёрдые частицы. В результате через питатель вместе с потоком жидкости в полость формы попадают лишь отдельные случайные частицы опилок.

В реальных условиях внутриформенного модифицирования чугуна процесс закупорки выходного сечения реакционной камеры крупными частицами ферросплава может и не происходить благодаря постоянному уменьшению их размеров за счёт плавления и растворения в жидкости. Учитывая, что чем больше размер частиц, тем больше времени необходимо для их растворения в жидкости, эффективность объёмного механизма взаимодействия твёрдой и жидкой фаз в реакционной камере литейной формы (рис. 7, е) можно считать ниже эффективности их послойного взаимодействия (рис. 7, д).

Результаты гидравлического физического моделирования на прозрачных моделях процесса взаимодействия твёрдой и жидкой фаз в реакционной камере косвенно подтверждают и объясняют результаты натуральных экспериментов с ферросилицием ФС75. Мелкодисперсный ферросилиций с размером частиц менее 1,0 мм (включая пылевидную фракцию) взаимодействует с чугуном в соответствии с низкоэффективным поверхностным механизмом. Кусковой ферросилиций размером 5...10 мм прогревается и растворяется в потоке чугуна по объёмному механизму, однако результаты модифицирования добавками таких размеров не отличаются стабильностью. Гранулы ферросилиция размером 1,0...5,0 мм эффективно растворяются в потоке жидкого металла в соответствии с послойным механизмом взаимодействия частиц с расплавом чугуна.

## Выводы

Таким образом, при производстве отливки массой 5,0 кг оптимальные результаты внутриформенного графитизирующего модифицирования чугуна, склонного к кристаллизации с отбелом, достигаются присадкой в реакционную камеру обеспыленного ферросилиция марки ФС75 с размерами зёрен 1,0...5,0 мм.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Фесенко М. А. Внутриформенное модифицирование для получения чугунных отливок с дифференцированными структурой и свойствами / М. А. Фесенко, А. Н. Фесенко, В. А. Косячков // Литейное производство. – 2010. – № 1. – С. 7-12.
2. Патент 27681 U 2007 07328, B22D27/00. Спосіб виготовлення виливків з диференційованими властивостями / М. А. Фесенко, В. О. Косячков, А. М. Фесенко. – Заявл. 02.07.2007; опубл. 12.11.2007, Бюл. № 18.
3. Кривошеев А. Е. Модифицирование чугуна ферросилицием в форме / А. Е. Кривошеев // Литейное производство. – 1976. – № 6. – С. 20-21.
4. Бубликов В. Б. Межфазовое взаимодействие при внутриформенном модифицировании чугуна / В. Б. Бубликов // Процессы литья. – 1997. – № 3. С. 39-47.
5. Бубликов В. Б. Гидродинамика процесса внутриформенного модифицирования / В. Б. Бубликов // Там же. – 1997. – № 2. – С. 10-16.
6. Бубликов В. Б. Исследование кинетики продвижения расплава чугуна в зернистых модификаторах при внутриформенном модифицировании / В. Б. Бубликов // Там же. – 1997. – № 2. – С. 26-34.
7. Бубликов В. Б. Об особенностях модифицирования чугуна в вертикально-проточной реакционной камере / В. Б. Бубликов // Там же. – 2003. – № 3. – С. 29-35.
8. Патент 20297 U 2006 08282, B22D27/00. Установка для моделювання процесів внутрішньоформової обробки рідкого металу / А. М. Фесенко, М. А. Фесенко, В. О. Косячков. – Заявл. 24.07.2006, опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1.

## Анотація

Фесенко М. А., Косячков В. О., Фесенко А. М., Лук'яненко І. В., Фесенко К. В.  
Графітізувальне модифікування чавуну в ливарній формі

Досліджено процес внутрішньоформового графітізувального модифікування вихідного чавуну, схильного до кристалізації за метастабільною системою з вибіленням, подрібненими добавками феросиліцію марки ФС75 фракцій до 1,0 мм (включаючи пилоподібну), 1,0...2,5, 2,5...5,0 і 5,0...10,0 мм. Встановлено, що оптимальні результати внутрішньоформового графітізувального модифікування, які забезпечують повне усунення вибілення у виливках навіть у тонкому їх перерізі (3 мм) досягаються при використанні феросиліцію з розмірами зерен 1,0...5,0 мм. Така фракція феросиліцію допускає фільтрацію рідкого чавуну в проміжках між зернами модифікатора на певну глибину в реакційній камері та забезпечує відносно рівномірне розчинення зерен в потоці чавуну відповідно до найбільш ефективного поширеного механізму взаємодії частинок модифікатора з розплавом.

## Ключові слова

внутрішньоформове модифікування, графітізувальний модифікатор, подрібнена добавка, реакційна камера, феросиліцій, білий чавун, структура чавуну

## Summary

Fesenko M., Kosyachkov V., Fesenko A., Lukianenko I., Fesenko K.  
In-mold graphitizing modification of iron

The process of in-mold graphitizing modification of base cast iron inclinable to the metastable system crystallization by chilling crushed ferrosilicon additives FeSi75 with fractions to 1,0 mm (including powdered), 1,0 ... 2,5, 2,5 ... 5,0 and 5,0 ... 10,0 mm was researched. It has been established that optimal results of in-mold graphitizing modification which ensure complete removal of chilling in castings even in their thin cross section (3 mm) obtained by using ferrosilicon with a grain size of 1,0 ... 5,0 mm. This ferrosilicon fraction allows filtering of molten cast iron between the grains of the modifier to a predetermined depth in the reaction chamber, and provides a relatively uniform dissolution of the grains in the cast iron flow according to the most effective fiberwise mechanism of interaction modifier particles with the melt.

## Keywords

in-mold modification, graphitizing modifier, crushed additive, reaction chamber, ferrosilicon, white cast iron, cast iron structure

Поступила 17.09.2015