

**В.А. Чайкин** (филиал Московского государственного открытого университета, г. Сафоново),  
**А.В. Чайкин** (Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана),  
**И.Н. Вольнов** (ЗАО "Русская промышленная компания", г. Москва)

## Исследование процесса позднего модифицирования с использованием моделирования

*Моделирование процесса внутриформенного модифицирования в программе FLOW-3D показало эффективность модификатора на основе дисперсных порошков графита и кремния и позволило оптимизировать содержание в нем магния. Опытное-промышленное опробование подтвердило результаты моделирования и позволило внедрить модификатор в производство.*

*Simulation of the in-mold inoculation process using FLOW-3D program has shown the efficiency of the inoculant on the basis of dispersed graphite and silicon powders and allowed to optimize magnesium content in it. Industrial experiments have confirmed the simulation results and allowed to introduce the inoculant into the production.*

**Ключевые слова:** моделирование; модифицирование; отливки; графит; кремний.

**Keywords:** simulation; inoculation; castings; graphite; silicon.

**Постановка и анализ проблемы.** Позднее модифицирование расплава является одним из эффективных методов устранения кромоочного отбела в отливках из серого и высокопрочного чугунов. В стальном литье модифицирование в форме измельчает первичное зерно аустенита, уменьшает глубину зоны столбчатых кристаллов, устраняет видманштеттовую структуру, а также уменьшает усадку в отливках.

Для борьбы с перечисленными выше дефектами был разработан универсальный смесевой модификатор, предназначенный для внутриформенной обработки чугунов и сталей. Основной отличительной особенностью материала является высокая дисперсность порошков графита и кремния, которые положены в основу модификатора.

Обязательными условиями решения задачи было сохранение существующих конструкций литниковых систем и равномерное распределение частиц модификатора в отливках. Модификатор предполагалось засыпать в стояк и размещать в зумпфе литейной формы. Равномерность распределения частиц в отливке должна обеспечиваться турбулентностью потока и их высокой дисперсностью.

Известно, что диспергирование препятствует смачиваемости частиц расплавом, поэтому для обеспечения растворимости модификатора в его состав ввели сублимирующие соединения магния. Пузырьки паров магния взрывают поверхностные слои модификатора, облегчая проникновение расплава в промежутки между частицами, обеспечивая тем самым их последовательную растворимость [1].

*Цель данной работы* — определение оптимальной добавки магнийсодержащих элементов для обеспечения растворимости модификатора, проверка равномерности распределения частиц в отливке после внут-

риформенного модифицирования, а также определение эффективности смеси.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Моделирование в программе FLOW-3D® процесса внутриформенного модифицирования смесью порошков графита, кремния и магния расплава, заливаемого в литейную форму.
2. Опытное-промышленное опробование эффективности смесевого модификатора.
3. Внедрение разработок в производство.

**Результаты исследований и обсуждение.** Для моделирования процесса модифицирования была использована технология формы, разработанная в ОАО "Чебоксарский агрегатный завод" [2].

Изучали поведение частиц модификатора, первоначально расположенных в зумпфе литейной формы, которые в процессе заливки переходили в расплав и переносились им в полость литейной формы.

При постановке задачи моделирования исходили из наблюдений следующих нюансов физических процессов, происходящих в реальном процессе заливки формы. При отсутствии в модификаторе соединений магния вынос частиц модификатора из зумпфа потоком расплава практически отсутствует. При попадании первых порций расплава на поверхность модификатора происходит процесс, аналогичный образованию механического пригара в отливках с проникновением расплава в поры между частицами модификатора и его затвердеванием.

Картина изменяется внесением соединений магния, испарения которых сопровождается выделением теплоты испарения и образованием пузырьков, что приводит к разогреву и механическому разрушению образовавшейся на поверхности модификатора корочки металла и выносу частиц модификатора в рас-



плав. Таким образом, соединения магния оказывают двойное влияние на разрушение корочки металла: тепловое и механическое.

При моделировании данную физическую картину упростили. Механическую часть энергии влияния соединений магния (энергия образования пузырьков) заменили на эквивалентную тепловую энергию и таким образом свели задачу исключительно к тепловой. Технически это реализовывалось расположением в зумпфе металла заливаемого расплава с начальной температурой, равной начальной температуре модификатора. Внутри этой порции металла задавались частицы модификатора, которые оказывались как бы замороженными в металл. Соединения магния моделировались заданием в зумпфе равномерно распределенного источника тепловой энергии, определенной эквивалентной реальному процессу мощности.

Используемый модификатор МКМг19 является смесевым и содержит частицы кремния и графита. В моделировании модификатор принимали состоящим только из частиц кремния с соответствующими соединениями магния.

Частицы моделировали как идеальные сферы с заданными постоянными размером и плотностью без возможности их изменения (роста или растворения) в процессе течения расплава. Диаметр частиц приняли равным 15,1 мкм, что соответствует среднему размеру частиц кремния в модификаторе, плотность частиц — 2,33 г/см<sup>3</sup>.

Количество частиц модификатора выбирали из требования содержания в 1 см<sup>3</sup> расплава 10<sup>7</sup> частиц. Моделирование такого огромного количества частиц является неоправданным в смысле эффективного применения вычислительных ресурсов, поэтому при моделировании использовали значительно меньшее (1,15 частиц в 1 см<sup>3</sup>), но тоже большое (в масштабе отливки) число частиц.

При моделировании частиц в потоке в программе FLOW-3D® применяли опцию "полного взаимодействия" в системе частица–расплав, т.е. не только поток определяет динамику частиц, но и последние влияют на течение расплава.

В моделировании изучали поведение частиц модификатора в зависимости от содержащихся в нем соединений магния, концентрацию которых варьировали от 0 до 6 %, что соответствовало мощности теплового источника  $Q_{ист} = 0...2000$  Вт. Влияние магния количественно оценивали по кривым изменения количества частиц в отливке (без литниковой системы) в процессе заливки формы (рис. 1).

Моделирование показало, что при отсутствии магния в модификаторе ( $Q_{ист} = 0$  Вт) только ~ 3,5 % частиц переходит из зумпфа в отливку. Отливка оказывается немодифицированной. Добавка в модификатор 3 % Mg ( $Q_{ист} = 1000$  Вт) не решает проблему, так как модификатор растворяется не полностью и в отливке оказывается ~25 % частиц. При введении в модификатор 6 % Mg ( $Q_{ист} = 2000$  Вт) процесс растворения происхо-

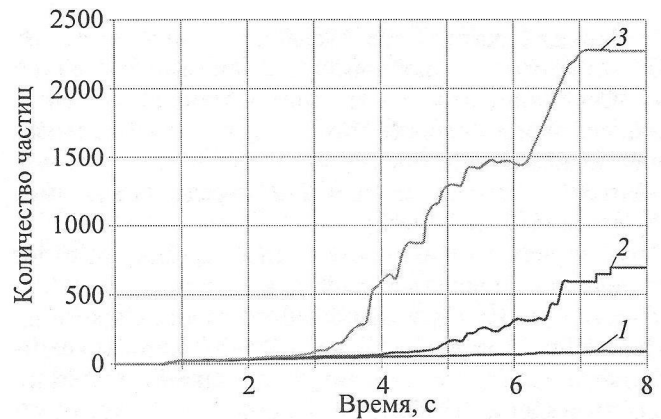


Рис. 1. Изменение количества частиц в отливке в процессе заливки формы:

1 — магний в модификаторе отсутствует,  $Q_{ист} = 0$  Вт; 2 — 3 % Mg,  $Q_{ист} = 1000$  Вт; 3 — 6 % Mg,  $Q_{ист} = 2000$  Вт

дит полностью. Все частицы переходят в отливку и равномерно распределяются в ее теле. Только в этом случае можно говорить об эффективном модифицировании.

Аналогичные закономерности получены для модификатора, состоящего только из частиц графита, т.е. поведение частиц кремния и графита в отливке в процессе заполнения формы аналогичны. Это связано с тем, что оба материала близки по плотности и размерам. Можно утверждать, что выявленные закономерности сохранятся и при использовании смесового модификатора.

Механизм воздействия вводимых частиц на процесс кристаллизации определяется температурным полем расплава и распределением химических элементов к моменту начала выделения твердой фазы. Температурные и концентрационные флуктуации в отливке при модифицировании в форме распределяются крайне неравномерно, что обусловлено разными темпами охлаждения расплава в центре и на периферии литой заготовки.

Микроучастки, отличающиеся по температуре и химическому составу от основного расплава, оказывают существенное влияние на процесс кристаллизации. Число таких микрозон при применении разрабатываемого модификатора достаточно велико. Температура расплава в этих микроучастках будет значительно ниже температуры окружающего расплава. Следовательно, при достижении основным расплавом температуры ликвидуса отдельные микрозоны могут переохладиться настолько, что в них уже будет происходить выделение твердой фазы. В результате произойдет интенсификация зародышеобразования по всему сечению отливки и переход от направленной кристаллизации к объемной.

Так как коэффициент температуропроводности существенно выше коэффициента диффузии, то и вероятность сохранения концентрационных флуктуаций значительно выше, чем температурных.



В модификаторе преобладают частицы кремния. В соответствии с тройными диаграммами состояния Fe—C—Si концентрация кремния в кристаллах железа меньше, чем в жидкости, таким образом, кристаллизация модифицированных чугуна и стали будет сопровождаться вытеснением кремния перед движущимся фронтом кристаллизации.

В чугунах в зонах, обогащенных кремнием, будет выделяться первичный графит, кроме того будут создаваться условия для образования карбида кремния. Первичный графит, а также SiC, имеющий гексагональную сингонию и форму, — идеальные подложки для зарождения графитной фазы в чугуне, имеющей аналогичную кристаллическую решетку.

В стали обогащение зон кремнием резко повышает активность углерода, что способствует образованию дополнительных карбидных фаз с близко расположенными карбидообразующими элементами, которые всегда присутствуют в сталях. Немаловажен тот факт, что флуктуации кремния будут дораскислять металл. Образующиеся оксиды кремния и образовавшиеся карбиды других элементов когерентны с решеткой аустенита и служат центрами его кристаллизации, измельчая зерно.

Входящий в состав модификатора магний будет способствовать дальнейшему измельчению структуры

стали как поверхностно-активный элемент, что ослабит склонность металла к образованию видманштеттовой структуры и перлитной сетки.

Наиболее важным для данного типа кристаллизации является то, что отвод теплоты от расплава к частицам происходит в течение всего времени затвердевания отливки. Так как интенсивность внутреннего теплообмена значительно выше интенсивности внешнего теплообмена, температурный градиент в каждом микрообъеме не совпадает с преимущественным направлением внешнего теплоотвода в отливке. Это способствует дальнейшему измельчению структуры, разориентировке дендритов, повышает объемность затвердевания.

Сочетание зародышеобразующего действия частиц с благоприятным воздействием на перегрев и скорость кристаллизации способствует эффективному измельчению структуры сплавов, уменьшению (вплоть до полного исчезновения) зоны столбчатой кристаллизации. Объемная кристаллизация способствует снижению усадочных явлений, что особенно важно для отливок из стали и заготовок из ЧШГ.

Для подтверждения результатов моделирования провели испытания разработанного модификатора в условиях действующего производства. Эксперименты с серым и высокопрочным чугуном осуществляли в ОАО "АВТОВАЗ". Отливки — 2101-1601093 "диск сцепления нажимной" из серого чугуна перлитного класса марки Gh190 в силу своих конструктивных особенностей всегда имеет кромочный отбел (рис. 2). Ковшовое модифицирование чугуна ферросилицием ФС75 и ФС65Ba4, а также модификаторами зарубежного производства фирмы "Элкем" не устраняло этот брак, поэтому отливки отжигали.

Для устранения кромочного отбела провели модифицирование отливок в форме модификатором МКМг19.

Результаты экспериментов показали высокую эффективность модификатора МКМг19. Уже при добавках в форму модификатора 0,05 % от ее металлоемкости отбеленный слой, достигавший в немодифицированной отливке 5 мм, уменьшился на 90 %. При вводе в форму 0,1 % модификатора отбел в отливке устранен полностью, обеспечена благоприятная микроструктура и твердость (рис. 3). Такая величина добавки модификатора оптимальна для серого чугуна.

Оптимальное количество модификатора для внутриформенного модифицирования высокопрочного чугуна определяли на проблемной отливке 12101-3103015 "ступица переднего колеса" из высокопрочного чугуна марки ВЧ 50, кристаллизующейся с отбелом (рис. 4).

Чугун модифицировали в ковше никель-магниевого лигатурой при температуре расплава 1490 °С. Количество смесового модификатора МКМг19 изменяли от 0,05 до 0,2 % от металлоемкости формы. Эксперименты показали, что оптималь-

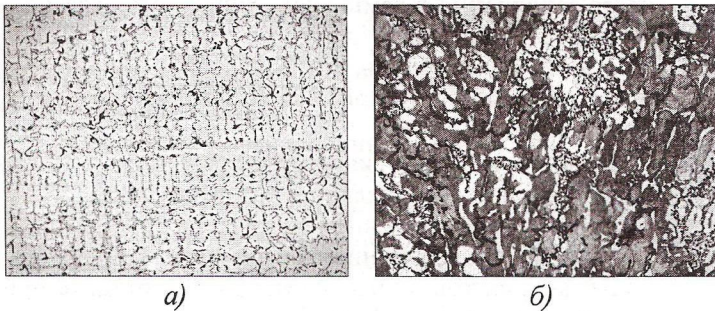


Рис. 2. Микроструктура немодифицированной в форме отливки: а — не травлено: ПГд (15, 25) — ПГр (4, 8) — ПГ10 (×100); б — травлено: цементит (×400)

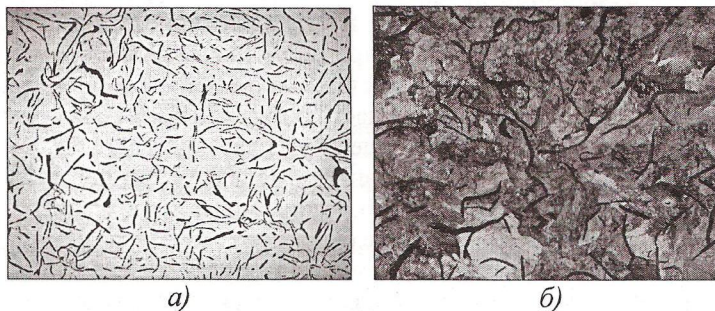


Рис. 3. Микроструктура отливки, модифицированной в форме 0,1 % МКМг19: а — не травлено: ПГф(1, 2) — ПГд(45, 90) — ПГр (3, 1) — ПГ(10, 12) (×100); б — травлено: перлит (×400)



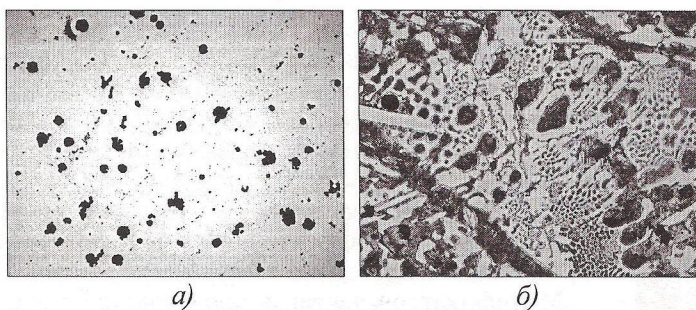


Рис. 4. Микроструктура немодифицированного в форме чугуна: а – не травлено: ШГф3 – ШГд90 – ШГ2 – ШГр2 (×100); б – травлено: 100 % ледебурита (×400)

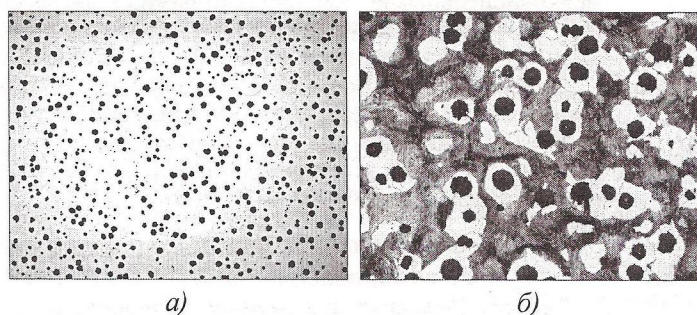


Рис. 5. Микроструктура чугуна, модифицированного в форме 0,15 % МКМг19: а – не травлено: ШГф5 – ШГд15 – ШГ12 – ШГр2 (×100); б – травлено: П55 – Ф45 – Ц0 (×400)

ной добавкой модификатора следует считать 0,15 % МКМг19. В данном случае отбел в отливках устраняется полностью и обеспечивается требуемый комплекс механических свойств (рис. 5).

Эффективность внутриформенного модифицирования МКМг19 определяли на отливках из стали 110Г13Л, которая наиболее склонна к транскристаллизации, ликвации и усадке. Конструктивные особенности отливки 74-34-501 "звено гусеницы" делают ее наиболее восприимчивой к усадочным раковинам в перемычке звеньев между цевкой заднего хода и беговой дорожкой.

Оптимальную добавку модификатора определяли в сталелитейном цехе ОАО "Чебоксарский агрегатный

завод". В форме находятся четыре отливки. Подвод металла к ним односторонний в полотно отливок, что обеспечивает минимальную металлоемкость литниковой системы. Однако при этом через узкое сечение перемычек проходит значительное количество металла. Это вызывает местный перегрев, что увеличивает склонность к транскристаллизации и образованию пор усадочного происхождения (рис. 6).

В условиях сталелитейного цеха ОАО "Чебоксарский агрегатный завод" оптимальной оказалась добавка в форму 0,2 % модификатора МКМг19 от ее металлоемкости. Количество пор и раковин в отливке сократилось на 80 %, устранена транскристаллизация, получены благоприятная микроструктура и механические свойства стали (рис. 7). Прочность на изгиб литого модифицированного трака увеличилась на 4,89 %.

Эффективность внутриформенного модифицирования проверяли на отливке 08.35505.29.00005У "зуб ковша". Конструктивные особенности этой отливки обуславливают получение усадочной раковины и транскристаллитной структуры в наиболее нагруженном месте, что приводит к поломке зубьев на экскаваторах, а иногда и в литом состоянии при выбивке, обрубке и транспортировке отливок к печам отжига.

Модифицирование стали в литейной форме разработанным модификатором МКМг19 в количестве 0,2 % от металлоемкости уменьшило протяженность усадочной раковины в 4,5 раза, резко снизило величину зоны столбчатых кристаллов (рис. 8). Получена более благоприятная микроструктура стали и, как следствие, ее ударная вязкость выросла на 39,8 %, а износостойкость – на 34,4 %.

Таким образом, подтверждены результаты моделирования и эффективность модификатора, что позволило внедрить модификатор в производство.

Модификатор МКМг19 внедрен на Ярославском электромашиностроительном заводе для внутриформенного модифицирования сложных тонкостенных корпусов электродвигателей для исключения кромочного отбела и ликвидации операции их отжига. Модификатор засыпается в зумпф литейной формы в количестве 0,05 % от ее металлоемкости. ТОО "ПФ КАСТИНГ" (г. Павлодар) модифицирует в форме сме-

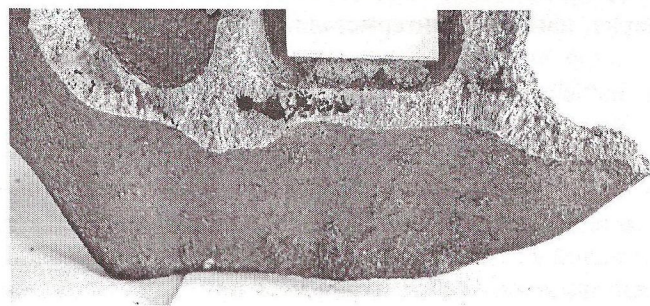


Рис. 6. Излом немодифицированной отливки

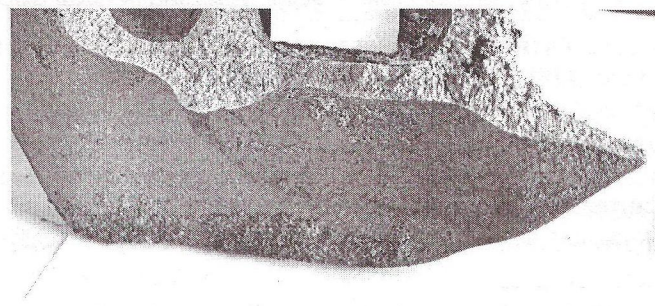
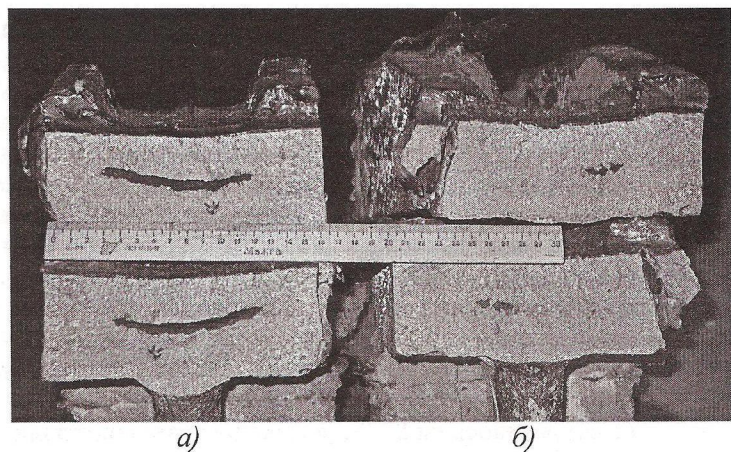


Рис. 7. Макроструктура отливки, модифицированной в форме модификатором в количестве 0,2 % от ее металлоемкости





**Рис. 8.** Результаты эксперимента с отливкой "зуб ковша":  
*а* – излом немодифицированной отливки; *б* – излом отливки, модифицированной МКМг19 в количестве 0,2 % от металлоемкости формы путем засыпки в стояк

севым модификатором стальные отливки, благодаря чему снижена склонность к усадке, увеличена трещиностойчивость, измельчено зерно и повышены механические свойства стали. Суммарный экономический эффект составил свыше трех миллионов рублей.

**Заключение.** Моделирование процесса внутрiformенного модифицирования позволило оптимизировать химический состав смесового дисперсного модификатора и подтвердило равномерность его распределения в отливке за счет дисперсности и турбулентности потока расплава.

Опытно-промышленное опробование подтвердило высокую эффективность модификатора и результаты моделирования.

Модификатор внедрен в производство с экономическим эффектом.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковалевич Е.В. Теоретические основы и практика получения чугуна с шаровидным графитом мелкодисперсными модификаторами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: ЦНИИИТМАШ, 1996. 34 с.
2. Чайкин В.А., Вольнов И.Н., Чайкин А.В. Использование моделирования и методов математической статистики для анализа процесса модифицирования чугуна // Заготовительные производства в машиностроении. 2009. № 4. С. 3–8.

*Владимир Андреевич Чайкин, канд. техн. наук,  
 sro\_ral@mail.ru;*

*Андрей Владимирович Чайкин, аспирант;  
 Илья Николаевич Вольнов, канд. техн. наук*