

Рис.3. Распределение температурных полей в отливке

ров технологического процесса изготовления отливки.

OPTICast позволяет определить оптимальные характеристики изготовления годной отливки с учетом заданных пользователем параметров. Например, можно определить оптимальную температуру заливки сплава в форму или размеры прибылей для достижения максимального выхода годного.

Все расчеты в OPTICast производятся автоматически после задания необходимых параметров. Результат выводится в виде наглядных графиков и конкретных величин.

Программный комплекс SOLIDCast может применяться для моделирования следующих способов литья:

- литье в песчано-глинистые формы и ХТС;

- литье в кокиль;
- литье по выплавляемым моделям;
- литье в оболочковые формы;
- литье в изложницу;
- литье под низким давлением;
- литье с переворотом формы или в наклонную форму.

Все результаты расчетов, полученные с помощью программы SOLIDCast, могут быть сохранены в виде графических файлов в формате JPEG, анимации в формате AVI или таблиц Excel.

Широкие функциональные возможности и уникальная ценовая политика разработчиков позволяет назвать программу SOLIDCast лучшей по соотношению цена/возможности/производительность, так как одна приобретенная лицензия SOLIDCast позволяет установить и использовать программу на пяти рабочих местах в рамках одного предприятия.

В настоящее время в мире продано около четырехсот коммерческих лицензий. В России программу SOLIDCast используют более двадцати промышленных предприятий и несколько университетов.

Компания «Делкам-Урал» более 15 лет работает на рынке инженерного программного обеспечения для моделирования технологических процессов и является официальным дилером программного комплекса SOLIDCast на территории РФ. Мы имеем квалифицированных специалистов для оказания технической поддержки, проведения обучения, а также решения самых сложных производственных задач в области технологических процессов литья, термообработки, сварки и обработки металлов давлением.

**ООО «Делкам-Урал»**

Тел.: (343) 214-46-70, факс: (343) 214-46-76

E-mail: osv@delcam-ural.ru

www.delcam-ural.ru

А.В. Чайкин (МГТУ им. Баумана), И.Н. Вольнов (канд. техн. наук, ЗАО «Русская промышленная компания»), В.А. Чайкин (канд. техн. наук, филиал МГОУ, г. Сафоново), Ю.А. Уханов, Н.Р. Петров (ОАО «ЧАЗ»)

## Анализ эффективности модификаторов с использованием статистики и моделирования

ОАО «Чебоксарский агрегатный завод» освоил производство отливок «Клин фрикционный» (рис. 1) из серого чугуна марки СЧ30, которые предназначены для тележек грузовых вагонов.

Отливку «Клин фрикционный» необходимо изготавливать в соответствии с требованиями ТУ, которые приведены в табл. 1.

Чугун для производства отливок клиньев должен иметь перлитную металлургическую матрицу. Присутствие цементита как структурной составляющей не допускается. Отливки изготавливают в сталелитейном цехе, плавку ведут в дуговой электропечи ДСП – 6. Выпуск металла производится в раздаточный ковш вместимос-

тью 8 т. Формы заливают из ковша металлоемкостью 500 кг. При переливе чугуна из раздаточного ковша в разливочный расплав модифицируют ферросилицием ФС75 в количестве 0,5% для исключения отбела на контролируемых поверхностях отливок. Практический опыт работы показал, что при величине отбела на технологической пробе более 10 мм в отливках появляется цементит. Расплав с такой склонностью к отбелу не допускают к заливке форм. Вместе с тем, несмотря на жесткий контроль параметров заливки, в отдельных партиях отливок обнаруживали междендритный графит и до 10% цементита. Как правило, цементит в отливках возникает только в наклонной и вертикальных

Таблица 1. Механические свойства и химический состав чугуна

Марка чугуна	Механические свойства		Химический состав, %							
	$\sigma_B$ , МПа	НВ	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
СЧ 30	$\geq 300$	197–260	3,0–3,2	1,3–1,9	0,7–1,0	0,2	0,12	0,4	0,4	0,4

стенках, хотя горизонтальные стенки более тонкие. Поэтому пробы на микроструктуру вырезают из указанных частей отливки.

Для исключения данного вида брака произвели анализ качественных показателей чугуна для отливки «Клин фрикционный» и моделирование процесса модифицирования.

На этапе I провели статистический анализ показателей качества плавок чугуна за три месяца работы цеха. В качестве изучаемых параметров выбрали механические свойства отливки, температуру разлива из раздаточного ковша, склонность к отбелу и химический состав чугуна.

Статистическую обработку производили с использованием компьютерной программы STATISTICS & ANALISIS [1]. Результаты статистической обработки приведены в табл. 2.

О стабильности свойств судили по величине вариаций. Из табл.2 видно, что химический состав чугуна достаточно однороден, особенно это касается элементов, которые получают расчетным путем, температура заливки чугуна, также стабильна, что говорит о высокой технологической дисциплине на участке плавки. Соответственно, механические свойства чугуна отвечают требованиям ТУ и достаточно стабильны, то есть разнородность шихтовых материалов существенно не влияла на прочность и твердость отливки. Вместе с тем,

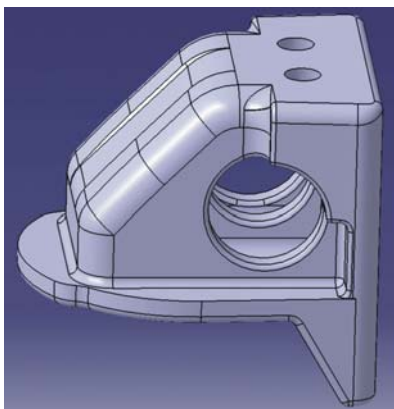


Рис. 1. Отливка «Клин фрикционный»

склонность к отбелу расплава в течение наблюдаемого периода колеблется в широких пределах, что и приводит к появлению цементита в отливках. В таких случаях в практике литейного производства применяют различные меры. Прежде всего, это изменение химического состава и температуры. Чтобы использовать статистические данные для уточнения химического состава и температуры, провели анализ нормальности распределения изучаемых показателей по критериям Колмогорова–Смирнова и Шапиро–Уилкса, что дало возможность выполнить регрессионный анализ

зависимости механических свойств чугуна от химического состава и температуры [2].

Адекватные уравнения регрессии имеют вид:  

$$\text{Отбел} = -3,5 + 0,017 t - 4,24 C + 3,99 \text{ Mn} - 1,48 \text{ Si} + 1,74 \text{ Cr};$$

$$\sigma = 33,62 + 0,023 t - 8,84 C + 5,9 \text{ Mn} - 8,33 \text{ Si} + 5,99 \text{ Cr};$$

$$\text{НВ} = 192,54 + 0,078 t - 13,83 C + 13,17 \text{ Mn} - 21,4 \text{ Si} + 0,9 \text{ Cr}.$$

Адекватность моделей проверяли с помощью анализа остатков. Анализ показал, что последовательные остатки независимы между собой, имеют нормальный закон распределения с нулевым математическим ожи-

Таблица 2. Показатели статистики за квартал

Изучаемые переменные		Основные статистические показатели					
		Среднее значение	min	max	Ср. кв. откл. S	Дисперсия S <sup>2</sup>	Коэф. вариаци. V %
Температура, С		1428,093	1360,000	1470,000	14,78118	218,4832	1,04
Отбел, мм		8,253	5,000	13,000	1,63084	2,6597	19,76
Мех. свойства	$\sigma_B$ , МПа	301,95	208,00	383,00	28,1355	791,60	9,32
	НВ	235,877	217,000	271,000	8,15808	66,5536	3,45
Содержание элементов, %	C	3,098	2,920	3,250	0,06537	0,0043	2,11
	Mn	0,825	0,320	1,0	0,07489	0,0056	9,07
	Si	1,812	1,580	2,090	0,09541	0,0091	5,2
	Cr	0,139	0,100	0,260	0,02073	0,0004	14,91

данием и постоянной дисперсией.

Для снижения отбела следует снижать температуру, уменьшать концентрацию марганца или увеличивать содержания кремния и углерода. Однако снизить температуру заливки расплава практически невозможно, так как при этом ухудшаются условия заполнения полости формы и питания отливок во время кристаллизации, что может привести к неслитинам, недоливкам, усадочным раковинам, то есть к браку. Но самое главное, указанное изменение температуры и химического состава вызовет снижение предела прочности и твердости чугуна. Если уменьшение твердости положительно скажется на обрабатываемости отливок, то уменьшение предела прочности недопустимо, так как среднее значение этого показателя близко к нижнему пределу.

Таким образом, решить проблему исключения цементита в отливках изменением химического состава и температуры металла в условиях ОАО «ЧАЗ» представляет определенные трудности. Для решения задачи было предложено изменить технологию модифицирования. Вместо ферросилиция ФС75 использовать более эффективный смесевой модификатор МК 21, производимый Смоленским региональным отделением Российской ассоциации литейщиков по ТУ 0826 – 003 – 47647304 – 2001.

Модификаторы серии МК – пакетированные смеси, состоящие, в основном, из порошков активированного высокотемпературной обработкой углерода и полученного физико-химическим путем металлического кремния. Основная особенность МК заключается в том, что часть их находится в высокодисперсном состоянии, при этом степень дисперсности и специальные свойства, приобретаемые веществом при переходе в ультратонкое состояние, обуславливают резкое увеличение модифицирующей способности и «живучести» смеси.

Для определения зернового состава модификатора применили методику, широко используемую в литейном производстве, – рассев материала на стандартных ситах. Зерновой состав модификатора не подчиняется нормальному закону распределения частиц, поэтому для определения среднего размера гранул воспользовались правилом академика Колмогорова, согласно которому при механическом измельчении плотность распределения частиц  $P(x)$  подчиняется нормально-логарифмическому закону.

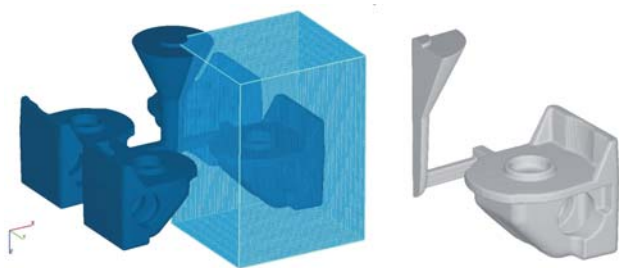
Средний размер частиц составляет 13,9 мкм. Расчеты показывают, что количество частиц в  $1 \text{ см}^3$  металла составляет  $15,2 \cdot 10^6$  шт./ $\text{см}^3$ . Таким образом, в чугун вводится большое количество дисперсных частиц графита и кремния, создающих идеальные условия для зарождения графитной фазы, так как частицы модификатора соизмеримы с фрактальными агрегатами графита [4]. Основным признаком фрактальности структуры – ее способность сохранять самоподобие в процессе эволюции в различных пространственно-временных масштабах [5]. С точки зрения синергетики, которая объединяет теории диссипативных структур, фракталов, сложных систем и др., перегретый жидкий чугун находится в пространственно-однородном

состоянии с довольно высокой степенью симметрии. Как только начинается процесс переохлаждения, происходит интенсивный обмен энергией с окружающей средой, появляется избыток свободной энергии, симметрия системы нарушается и возникает диссипативная структура с более низкой степенью симметрии. Эта структура, достигая в процессе эволюции системы порога неустойчивости, начинает самоорганизацию новой, более устойчивой на данном иерархическом уровне структуры. Система стремится к приобретению нового симметричного состояния и идет по пути создания фрактальной структуры. Этот момент важен, поскольку возможность получения заданной структуры наиболее высока. При формировании иерархической структуры имеют место управляющие параметры, которые в общем случае могут быть различными для различных иерархических уровней. Для поликристаллического материала, в котором присутствуют различные химические элементы, могут развиваться два сценария формирования структуры: при сравнимом количестве химических элементов различных групп управляющим параметром будут служить диффузионные затруднения; когда же содержание одних химических элементов будет подавляюще большим, управляющим параметром будет служить фрактальная размерность, которая и будет определять захват пространства [6].

В нашем случае в расплав вносится множество дисперсных частиц углерода и кремния, что будет способствовать формированию мелкозернистой структуры серого чугуна без наличия свободного цементита. Таким образом, искусственно создается структурная наследственность. Это не противоречит и термодинамике процесса, что подтверждено расчетами.

Следует отметить также, что при использовании дисперсных частиц гравитационные силы слабо контролируют кинетику системы «металл-частица», частицы совершают броуновское движение, и коэффициент их диффузионной подвижности увеличивается. Следовательно, они обладают высокой седиментационной устойчивостью. Возрастает также их термодинамическая устойчивость против растворения [7]. Все это резко увеличивает живучесть модификатора.

Для подтверждения правильности выбранного направления было произведено моделирование процесса модифицирования в программе **FLOW-3D®** ([www.flow3d.com](http://www.flow3d.com), [www.flow3d.ru](http://www.flow3d.ru)) модификаторами МК21 и ФС75. Процесс моделирования заключался в изучении поведения частиц модификаторов в расплаве при заполнении им полости литейной формы отливки. Выполнен анализ изменения количества частиц модификатора в процессе заливки в различных местах отливки. Поскольку модификатор МК21 является смесевым и состоит из частиц графита и кремния, для упрощения моделирования проводили отдельный расчет частиц кремний и частиц графита. Частицы моделировали как идеальные сферы с заданным постоянным размером и плотностью без возможности их изменения (роста или растворения) в процессе течения расплава. В каждой группе (кремний, графит, ФС75) частицы задавали одинакового размера, который равен среднему размеру частиц в модификаторе. Средние



**Рис. 2.** Полость литейной формы отливки «Клин фрикционный» с расчетной сеткой и численная модель для расчета в программе FLOW-3D®

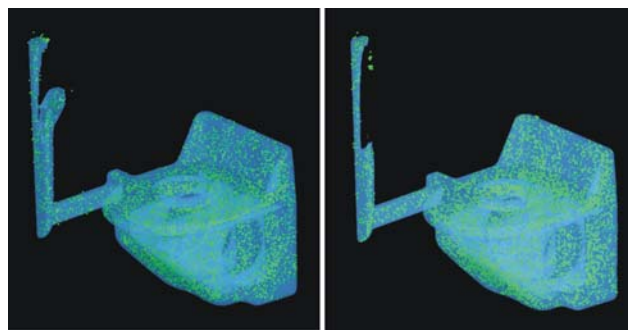
размеры частицы графита и кремния составляют 12,8 мкм и 15,1 мкм, соответственно. При моделировании частиц в потоке в программе FLOW-3D® использовали опцию «полного взаимодействия» в системе «частица-расплав», то есть не только поток определяет динамику частиц, но и последние оказывают влияние на течение расплава.

В 1 см<sup>3</sup> расплава находится 17,8·10<sup>6</sup> частиц графита и 6,2·10<sup>6</sup> частиц кремния. Расчет такого огромного количества частиц превышает возможности современных вычислительных систем, поэтому при моделировании использовали значительно меньшее (3,65 шт./см<sup>3</sup>), но тоже большое (в масштабе отливки) число частиц. Для сравнительного и качественного анализа поведения частиц кремния, графита и ФС75 такая замена вполне оправдана. Средний размер частиц ФС75 существенно выше и равен 5 мм. Одна частица ферросилиция приходится на 3 см<sup>3</sup> расплава. Для сравнительного анализа число частиц ФС75 было увеличено до 3,65 шт./см<sup>3</sup>.

Плотность материалов следующая: кремний – 2,33 г/см<sup>3</sup>; графит – 2,23 г/см<sup>3</sup>; ФС75 – 3,5 г/см<sup>3</sup>. Время заливки формы 20 с. В расплаве, входящем в полость литейной формы, задавалось случайное начальное распределение частиц.

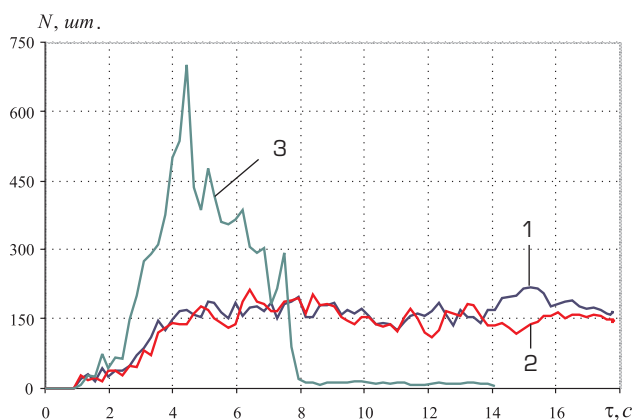
Для моделирования процесса модифицирования была использована технология формы, разработанная в ОАО «Чебоксарский агрегатный завод». В форме находятся четыре отливки (рис. 2). Принимая в расчет симметричное расположение отливок, для сокращения длительности расчета моделировали заполнение только одной отливки (четверти литейной формы).

Анализ распределения частиц модификаторов в отливке в зависимости от времени заполнения формы выполнили для характерного места отливки – наклонной стенки, в трех ее частях: нижней, средней и верхней (см. рис. 1). Для этих частей строили графики зависимости количества частиц модификаторов от времени заполнения. Моделирование показало, что закономерности распределения частиц графита и кремния в отливке в процессе заполнения формы аналогичны. Это связано с тем, что оба материала близки по плотности и размерам. Можно утверждать, что выявленные закономерности сохраняются и при использовании смесового модификатора. Кремний и углерод равномерно распредоточились по всему объему отливки (рис. 3), и с течением времени распределение на изучаемых высотах наклонной стенки практически не менялось (рис. 4–6).

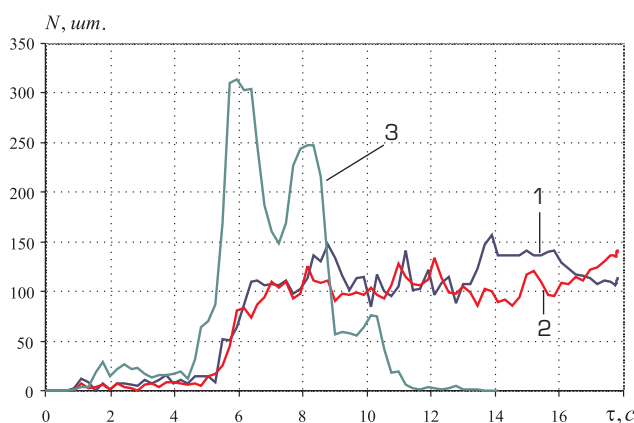


**Рис. 3.** Распределение частиц в отливке на момент окончания заливки: **а** – частицы графита; **б** – частицы кремния (для улучшения визуального восприятия размер частиц увеличен)

Это подтверждает теоретические предпосылки о том, что частицы графита и кремния, благодаря их дисперсности, обладают высокой седиментационной устойчивостью. Они активно «замутняют» расплав и способствуют образованию множества центров кристаллизации графита, что обеспечивает стабильность процесса модифицирования во всех частях отливки в течение всего времени кристаллизации, что следует из графиков.

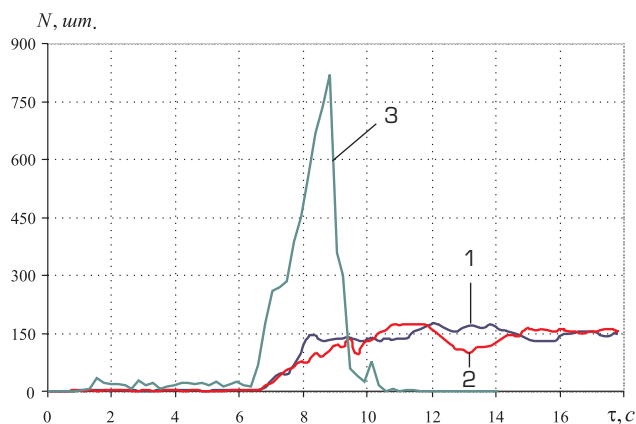


**Рис. 4.** Изменение во времени количества частиц графита (1), кремния (2) и ферросилиция (3) в верхней части наклонной стенки



**Рис. 5.** Изменение во времени количества частиц графита (1), кремния (2) и ферросилиция (3) в средней части наклонной стенки





**Рис. 6.** Изменение во времени количества частиц графита (1), кремния (2) и ферросилиция (3) в нижней части наклонной стенки

Крупные частицы ферросилиция, наоборот, всплывают на поверхность металла в процессе заливки, а в конце ее оказываются преимущественно в верхней части отливки (рис. 7). На рис. 4–6 количество частиц ФС75 имеют ярко выраженные экстремумы, которые обусловлены процессами заполнения расплавом с частицами заданных объемов отливки (частей наклонной стенки) и всплытием частиц с выходом их из этих объемов.

Это доказывает, что частицы ФС75 обладают низкой седиментационной устойчивостью из-за их крупных размеров. Поэтому ФС75 крайне неравномерно распределяется в расплаве в процессе заливки. Анализ показывает, что конструкция отливки и расположение ее в форме обуславливают повышенную вероятность возникновения отбела в наклонной и вертикальных стенках, где частиц ФС75 практически не остается. Результаты моделирования коррелируют с заводским опытом работы.

Для проверки теоретических предпосылок в сталелитейном цехе ОАО «ЧАЗ» были проведены опытные плавки серого чугуна СЧ30 для получения отли-



**Рис. 7.** Распределение частиц ферросилиция в расплаве на промежуточном этапе заливки

вок «Клин фрикционный». Для оптимизации расхода МК21 опробовали эффективность модифицирования чугуна в раздаточном и разливочном ковшах. Отмечена высокая живучесть модификатора. Время разлива расплава из раздаточного ковша колебалось от 45 до 65 мин. Во всех случаях эффект модифицирования расплава МК 21 сохранялся до конца разлива, что подтверждает высказанные ранее теоретические предпосылки результата моделирования.

Наиболее оптимальным оказалось модифицирование расплава в разливочном ковше. При этом требуется значительно меньшее количество модификатора МК21.

На основании проведенных экспериментов на ОАО «ЧАЗ» внедрен технологический процесс модифицирования чугуна СЧ30 для отливки «Клин фрикционный» в разливочном ковше. Первую половину металла, когда он горячий, модифицируют МК 21 в количестве 0,08% (пакет 400 г). Затем снижают расход материала до 0,04% (пакет 200 г).

**Таблица 3.** Показатели статистики после внедрения

Исследуемые переменные		Основные статистические показатели					
		Среднее значение	min	max	Ср. кв. откл. S	Дисперсия S <sup>2</sup>	Коеф. вариат. V %
Температура, С		1426,78	1390,00	1465,00	21,64	468,49	1,5
Отбел, мм		7,20	5,00	9,00	1,04	1,08	13,88
Мех. свойства	σ <sub>B</sub> , МПа	301,8	276	350,0	17,7	315	5,86
	НВ	234,3	217,0	247,0	8,02	64,38	3,42
Содержание элементов, %	С	3,08	2,86	3,20	0,095	0,009	3,11
	Mn	0,83	0,66	1,24	0,122	0,015	14,6
	Si	1,78	1,59	2,08	0,11	0,013	6,1
	Cr	0,14	0,10	0,20	0,023	0,0005	16,42

Наиболее объективным показателем эффективности внедренного технологического процесса модифицирования является статистический анализ. Произвели обработку данных 60-ти плавок чугуна после внедрения. Результаты приведены в табл. 3.

Сравнение результатов анализа до и после внедрения показывает, что температура, химический состав и механические свойства чугуна изменились незначительно от 0,09% (температура) до 1,65% (кремний). Вместе с тем, склонность чугуна к отбелу резко уменьшилась. Отбел снизился на 12,7% и стабилизировался, что подтверждает эффективность внедренного технологического процесса модифицирования. Проверка гипотез о равенстве групповых средних, в свою очередь, подтвердила сделанный вывод.

Внедрение позволило исключить брак по отбелу в отливках и получить годовой экономический эффект в размере 1 млн. 128 тыс. руб.

### Список литературы

1. Салин В. Н., Чурилова Э. Ю. Практикум по курсу «Статистика» (в системе STATISTIKA). – М.: Социальные отношения; Перспектива, 2003. – 188 с.
2. Демиденко Е. З. Линейная и нелинейная регрессии. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 189 с.
3. Гаврилин И. В. Строение жидкой и твердой фаз в литейных сплавах в твердожидком состоянии // *Металлургия машиностроения*. – 2003. – № 6. – С. 9–11.
4. Давыдов С. В. Новый подход к классификации методов модифицирования // *Металлургия машиностроения*. – 2006. – № 5. – С. 5–9.
5. Иванова В. С., Новиков В. У. К итогам симпозиума «Фракталы и прикладная синергетика» // *Металлургия машиностроения*. – 2004. – № 1. – С. 33–37.
6. Закиричная М. М. Образование фуллеренов в углеродистых сталях и чугунах при кристаллизации и термических воздействиях. – Дис. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук. – Уфа. – 2001.
7. Гаврилин И. В. Кластеры – фуллерены – фракталы в жидких литейных сплавах // *Металлургия машиностроения*. – 2004. – № 5. – С. 30–33.

И.М. Кавицкий (канд. техн. наук, заместитель директора ООО «Литейные технологии», г. Тула), Б.А. Рушаник (канд. экон. наук, директор ООО «Литейные технологии», г. Тула), А.А. Демидов (студент, ТГУ)

## Механизм воздействия модификаторов при структурообразовании высокопрочного чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом<sup>1</sup>

Получение в структуре чугуна графита шаровидной формы основано на отдельной или совместной обработке жидкого чугуна магнием, РЗМ, кальцием и другими сфероидизирующими графит веществами, присадками.

Наиболее распространенным в мировой практике способом получения высокопрочного чугуна является магниевый процесс, основанный на введении в расплав металлического магния, магниевых лигатур и комплексных модификаторов, содержащих магний [1–4].

Сотрудниками ООО «Литейные технологии», г. Тула, разработан способ получения высокопрочного чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом методом двойного модифицирования с использованием лигатур на базе РЗМ [5–7]. Первое принципиальное отличие этого процесса от магниевого заключается в том, что при первичном модифицировании вводят избыточное количество лигатуры с высоким содержанием РЗМ для получения эффекта перемодифицирования, выражающегося в кристаллизации матрицы в виде отбеленного чугуна [4]. Второе отличие в том, что вторичное модифицирование проводят той же лигатурой, что и первичное или смесевой лигатурой, содержащей в различных соотношениях лигатуру для первичного модифицирования, магниесодержащую лигатуру и ферросилиций.

Способ реализуется следующим образом. При первичном модифицировании содержащую РЗМ лигатуру, например ФСЗОРЗО, в количестве, зависящем от содержания серы в исходном сером чугуне и вместимости ковша, подают на струю металла или применяют «Сэндвич-процесс». Металл заливают при температуре 1420–1480°C и выдерживают в ковше 5–8 мин. Во время выдержки сливают шлак. При выдержке температура металла в ковше снижается на 50–80°C и происходит образование зародышей графита шаровидной формы. Микроструктура чугуна после первичного модифицирования и закаленного на воду с 950°C приведена на рис. 1, а. Видно, что на самой ранней стадии появления зародыши графита в модифицированном чугуне имеют компактную форму. На рис. 1, б приведена микроструктура чугуна после первичного модифицирования охлажденного на воздухе. Уже после первичного модифицирования графит имеет шаровидную и вермикулярную форму. Структура матрицы – перлитно-ледебуритно-цементитная. Вторичное модифицирование проводят «Сэндвич-процессом» в разливочных ковшах. Микроструктура после вторичного модифицирования чугуна приведена на рис. 1, в. После вторичного модифицирования форма графита вермикулярная и шаровидная, а матрица имеет ферритно-перлитную структуру – «бычий глаз».

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке гранта Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по теме: «Исследование и разработка способов оптимизации производства отливок из высокопрочного чугуна методом двойного модифицирования лигатурами на базе редкоземельных металлов».