



А.В. Чайкин (МГТУ им. Н.Э. Баумана),  
И.Н. Вольнов (ЗАО "Русская промышленная компания", г. Москва),  
В.А. Чайкин (филиал МГОУ, г. Сафоново),  
В.М. Малихин (ОАО "Чебоксарский агрегатный завод")

## Использование моделирования и методов математической статистики для анализа процесса модифицирования чугуна

*Эффективность дисперсных модификаторов теоретически обоснована и подтверждена моделированием процесса. Оптимизированы технологические параметры модифицирования. Разработки внедрены в производство с экономическим эффектом.*

*Efficiency of dispersed inoculants is theoretically substantiated and proved by the process simulation. Technological characteristics of inoculation process are optimized. Designs are introduced into the production with saving rate.*

**Ключевые слова:** серый чугун; модифицирование; моделирование; статистический анализ; регрессионный анализ.

**Key words:** gray cast iron; modification; modeling; statistical analysis; regression analysis.

**Постановка и анализ проблемы.** Чугунные заготовки составляют более 70 % общего объема выпуска отливок. Сложность чугуна как физико-химической системы значительно затрудняет создание технологий получения стабильных заданных свойств чугуна в отливках. Активно воздействовать на формирование этих свойств можно в процессах: шихтовки, плавки, термической и внепечной обработок.

Структура шихтовых материалов для выплавки чугуна изменяется из года в год в сторону сокращения объемов применения литейных доменных чугунов и замены их передельными, увеличения в шихте стального лома, что способствует повышению прочностных характеристик металла, так как в данном случае дисперсность графита максимальна. Однако во всех перечисленных случаях возникает повышенная склонность чугунов к усадке, отбелу, что влечет за собой повышение их твердости. Большое разнообразие способов выплавки чугуна, номенклатуры отливок по массе, их разностенность требуют создания и всестороннего изучения комплексного модификатора.

ОАО "Чебоксарский агрегатный завод" освоил производство отливки "клин фрикционный" (рис. 1) из серого чугуна СЧ30. Чугун фрикционных клиньев должен иметь перлитную металлическую матрицу.

Присутствие цементита как структурной составляющей не допускается.

Несмотря на жесткий контроль параметров заливки, в отдельных партиях отливок обнаруживали междендритный графит и до 10 % цементита. Как прави-

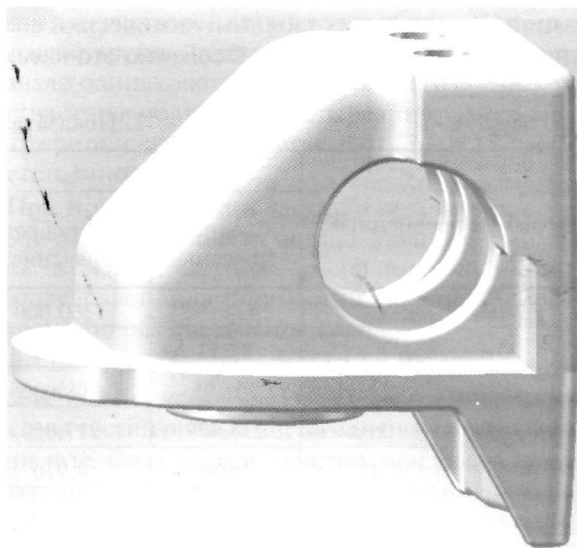


Рис. 1. Отливка "клин фрикционный"

ло, цементит в отливках возникает только в наклонной и в вертикальных стенках, несмотря на то, что горизонтальные стенки более тонкие.

Цель данной работы – исключение отбела в отливках. Для достижения цели решали следующие задачи:

1. Проведение сравнительного анализа эффективности различных модификаторов с использованием методов математической статистики и моделирования.

2. Разработка рекомендаций по устойчивому получению структуры серого чугуна марки СЧ30 с равномерно распределенным графитом при ковшовом модифицировании для снижения брака по отбелу и сокращения затрат на модифицирование. Внедрение разработки в производство.

Исследования проводились в условиях сталелитейного цеха ОАО "Чебоксарский агрегатный завод". Плавку вели в дуговой электропечи ДСП-6. Выпуск металла производили в раздаточный ковш емкостью 8 т, заливку форм – ковшом емкостью 500 кг. При переливе чугуна из раздаточного ковша в разливочный производили модифицирование расплава 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.

На первом этапе провели статистический анализ показателей качества плавов 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. Для статистической обработки использовали компьютерную программу STATISTICS & ANALYSIS [1]. Результаты приведены в табл. 1.

О стабильности свойств судили по коэффициенту вариаций. Как видно из таблицы, химический состав чугуна достаточно однороден. Особенно это касается

элементов, которые получают расчетным путем. Стбильна и температура заливки чугуна. Это говорит высокой технологической дисциплине на участке плавки. Соответственно механические свойства чугуна отвечают требованиям технических условий и достаточно стабильны, т.е. разнородность шихтовых материалов существенно не влияла на прочность твердость отливки.

Вместе с тем, 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 изменяют химический состав и температуру.

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

Адекватные уравнения регрессии имеют вид:

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

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

$$HB = 192,54 + 0,078t - 13,83C + 13,17Mn - 21,4Si + 0,9Cr,$$

где  $t$  – температура заливки.

Для снижения отбела следует снижать температуру, уменьшать концентрацию марганца или увеличивать содержание 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. Но самое главное заключается в том, что 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.

### 1. Показатели статистики за квартал

Изучаемые переменные	Основные статистические показатели						
	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднеквадратичное отклонение $S$	Дисперсия $S^2$	Коэффициент вариации $V, \%$	
Температура, °С	1428,093	1360,000	1470,000	14,781	218,483	1,04	
Отбел, мм	8,253	5,000	13,000	1,631	2,6597	19,76	
Механические свойства	$\sigma_B$ , МПа	301,95	208,000	383,000	28,1355	791,60	9,32
	HB	235,877	217,000	271,000	8,158	66,554	3,45
Содержание элементов, %	C	3,098	2,920	3,250	0,065	0,004	2,11
	Mn	0,825	0,320	1,0	0,075	0,006	9,07
	Si	1,812	1,580	2,090	0,095	0,009	5,2
	Cr	0,139	0,100	0,260	0,021	0,0004	14,91

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 МК21, 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. Эта степень дисперсности и специальные свойства, приобретаемые веществом при переходе в ультратонкое состояние, обуславливают резкое увеличение модифицирующей способности и "живучести" смеси. Средний размер частиц составляет 13,9 мкм. Расчеты показывают, что 1 см<sup>3</sup> металла содержит 15,2·10<sup>6</sup> частицу.

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]. Основной признак фрактальности структуры – ее способность сохранять самоподобие в процессе эволюции в различных пространственно-временных масштабах [5].

С точки зрения теории синергетики, которая включает в себя описание эволюционных процессов и переходов с выбором альтернатив от состояний неустойчивости к гомеостазу, перегретый жидкий чугун находится в пространственно-однородном состоянии с довольно высокой степенью симметрии. Как только начинается процесс переохлаждения, происходит обильный обмен энергией с окружающей средой, появляется избыток свободной энергии, симметрия системы нарушается и возникает диссипативная структура с более низкой степенью симметрии.

Диссипативная 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 металлургическая наследственность. Это не противоречит и термодинамике процесса, что подтверждено расчетами.

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 кремния 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, равного среднему размеру частиц в модификаторе. Средние размеры частицы графита и кремния составляют 12,8 и 15,1 мкм соответственно.

При моделировании частиц в потоке в программе FLOW-3D использовали опцию "полного взаимодействия" в системе частица – расплав, т.е. 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

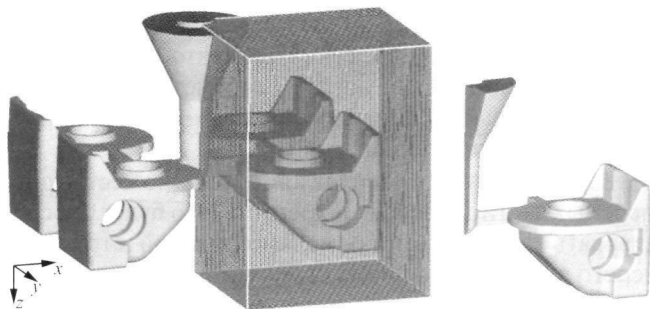


Рис. 2. Полость литейной формы отливки "клин фрикционный" с расчетной сеткой и численная модель для расчета в программе FLOW-3D

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, 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 (1/4 литейной формы).

Анализ распределения частиц модификаторов в отливке в зависимости от времени заполнения формы выполняли для характерного места отливки – наклонной стенки – в трех ее частях: нижней, средней и верхней. Для этих частей строили графики зависимости числа 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

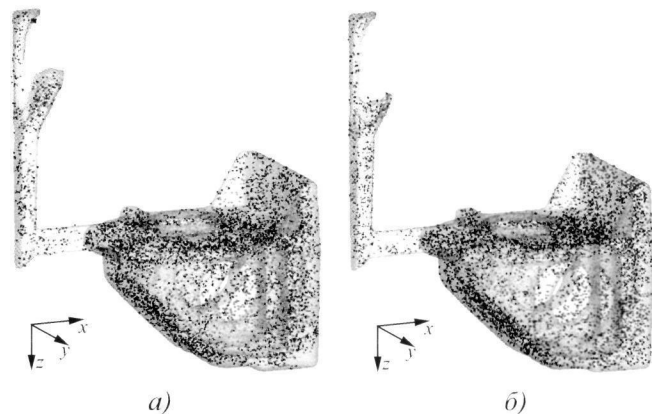


Рис. 3. Распределение частиц в отливке в момент окончания заливки:

*а* – частицы графита; *б* – частицы кремния (размер частиц увеличен)

размерам. Можно утверждать, что выявленные закономерности сохранятся и при использовании смешанного модификатора. Кремний и углерод равномерно рассредоточились по всему объему отливки (рис. 3) и с течением времени распределение на изучаемых высотах наклонной стенки практически не менялось (рис. 4–6).

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.

Крупные частицы ферросилиция, наоборот, всплывают на поверхность металла в процессе заливки, а в конце ее оказываются преимущественно в

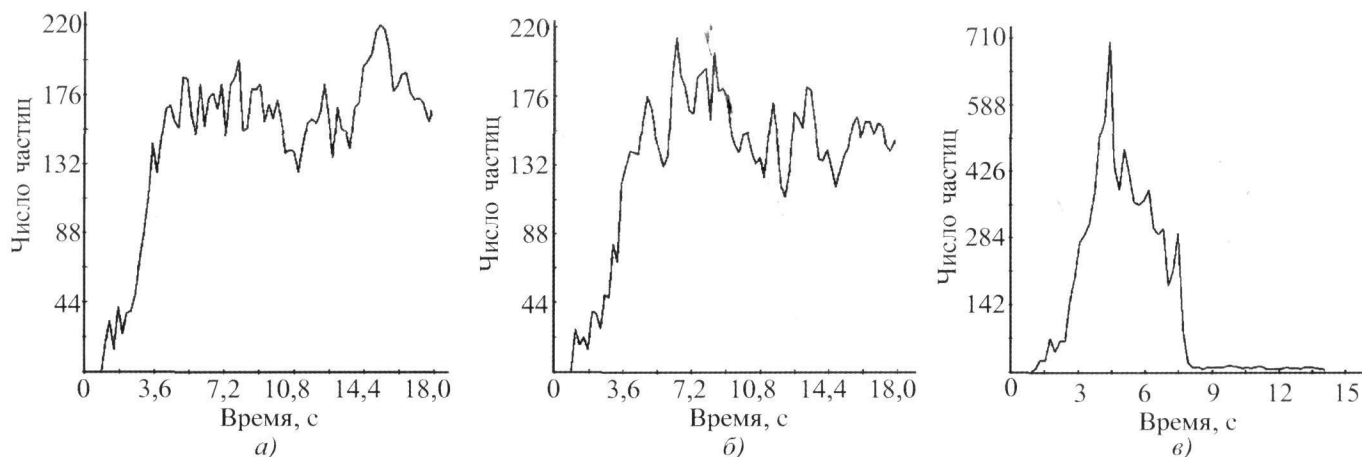


Рис. 4. Изменение во времени количества частиц графита (*а*), кремния (*б*) и ферросилиция (*в*) в нижней части наклонной стенки

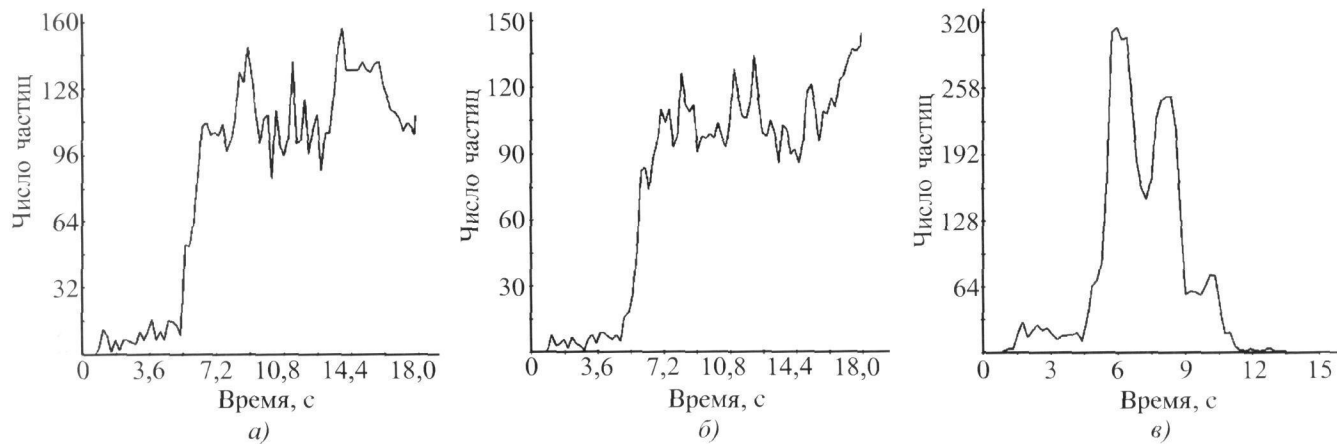


Рис. 5. Изменение во времени количества частиц графита (а), кремния (б) и ферросилиция (в) в средней части наклонной стенки

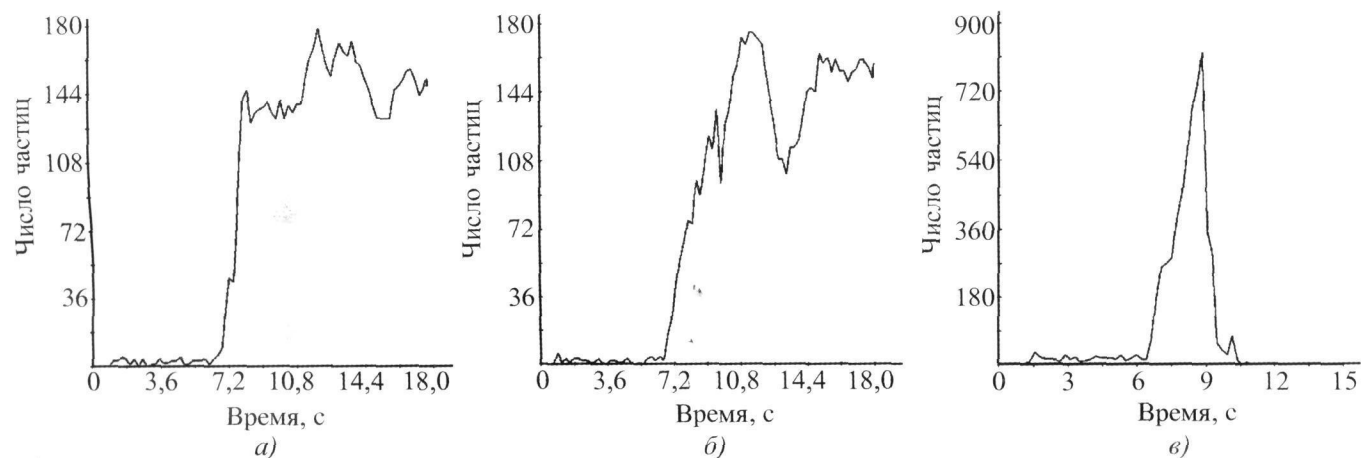


Рис. 6. Изменение во времени количества частиц графита (а), кремния (б) и ферросилиция (в) в верхней части наклонной стенки

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 заданных 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 заливки отливок "клин фрикционный". Для оптимизации расхода МК21 опробовали эффективность модифицирования чугуна в

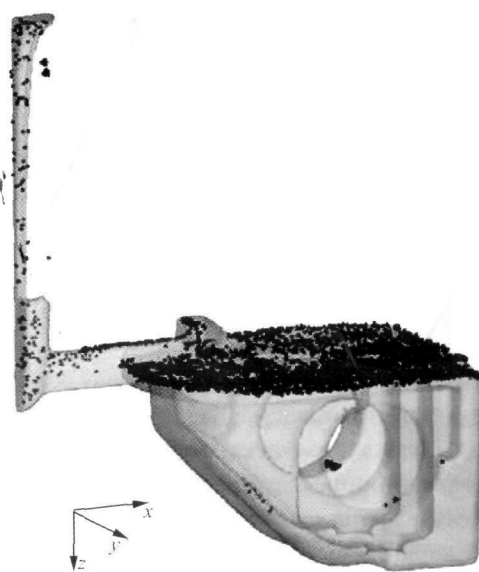


Рис. 7. Распределение частиц ферросилиция в расплаве на промежуточном этапе заливки (размер частиц увеличен)

## 2. Показатели статистики после внедрения нового процесса

Изучаемые переменные	Основные статистические показатели после внедрения нового процесса						
	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднеквадратичное отклонение $S$	Дисперсия $S^2$	Коэффициент вариации $V$ , %	
Температура, °C	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	
Механические свойства	$\sigma_B$ , МПа	301,8	276,0	350,0	17,7	315,0	5,86
	НВ	234,3	217,0	247,0	8,02	64,38	3,42
Содержание элементов, %	C	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

раздаточном и разливочном ковшах. Была отмечена высокая живучесть модификатора. Время разливки расплава из раздаточного ковша колебалось от 45 до 65 мин. Во всех случаях эффект модифицирования расплава МК21 сохранялся до конца разливки, что подтверждает высказанные ранее теоретические предпосылки, результаты моделирования.

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

На основании проведенных экспериментов в ОАО "ЧАЗ" внедрен технологический процесс модифицирования чугуна СЧ30 для отливки "клин фрикционный" в разливочном ковше. Первую половину металла, когда он горячий, модифицируют МК21 в количестве 0,08 % (пакет 400 г). Затем снижают расход материала до 0,04 % (пакет 200 г).

Наиболее объективным показателем эффективности внедренного технологического процесса модифицирования является статистический анализ. Произвели обработку данных 60 плавов чугуна. Результаты приведены в табл. 2.

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 вышеуказанный вывод.

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

## Выводы

1. Статистический и регрессионный анализы качественных характеристик чугуна марки СЧ30 показали высокую эффективность смесового дисперсного модификатора по сравнению с традиционным ФС75.

2. Моделирование процесса модифицирования в программе FLOW-3D подтвердило этот вывод.

3. Результаты работы внедрены в производство с экономическим эффектом.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Салин В.Н., Чурилова Э.Ю. Практикум по курсу "Статистика" (в системе STATISTIKA). М.: Издательский дом "Социальные отношения", Изд-во "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. Закирничная М.М. Образование фуллеренов в углеродистых сталях и чугунах при кристаллизации и термических воздействиях: дис. ... д-ра техн. наук. Уфа, 2001.

7. Гаврилин И.В. Кластеры – фуллерены – фракталы в жидких литейных сплавах // Металлургия машиностроения. 2004. № 5. С. 30–33.

*Андрей Владимирович Чайкин, инженер;  
Илья Николаевич Вольнов, канд. техн. наук;  
Владимир Андреевич Чайкин, канд. техн. наук;  
Вячеслав Михайлович Малихин, зам. гл. инженера*