

Л. З. ПИСАРЕНКО, ОАО «МЗОО»

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО И ВРЕМЕННОГО ФАКТОРОВ НА ЭФФЕКТ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ЧУГУНА

УДК 621.74:669.13

Рациональные технологические режимы модифицирования, гарантирующие максимальный эффект и высокое качество выплавляемого как серого, так и высокопрочного чугунов, связаны с перегревом расплава перед модифицированием и продолжительностью последующей выдержки. Изучали влияние этих факторов на эффект модифицирования серого чугуна доэвтектического состава. Определяли основные показатели эффекта модифицирования: степень измельчения эвтектического зерна и чувствительность чугуна к отбелу в интервале температур 1240—1520°С при добавках по 0,2% ферросилиция ФС75, силикокальция СК20, ферросиликобария ФС60Ba22, алюминия, а также 0,05% редкоземельной лигатуры ФС30P3M30.

Чугун выплавляли в индукционной печи ИСТ-016 емкостью 160 кг с кислой футеровкой. Химический состав чугуна составлял, мас. %: углерод —

3,3—3,4; кремний — 2,0—2,2; марганец — 0,6—0,7; сера — 0,03—0,04; фосфор — 0,09—0,16, железо — остальное.

Чугун перегревали до 1520°С, после чего индукционную печь отключали и по мере снижения температуры, через каждые 40°С, производили отбор и заливку проб модифицированного и немодифицированного чугуна. Результаты исследований влияния эффекта модифицирования ферросилицием, силикокальцием, алюминием и редкоземельной лигатурой в интервале температур 1240—1520°С представлены на рис. 1. Анализ микроструктуры опытных сплавов и полученных зависимостей свидетельствует о снижении эффекта модифицирования и повышении чувствительности чугуна к отбелу в условиях перегрева жидкого чугуна сверх оптимальных температур. Эта же закономерность характерна и для немодифицированного чугуна, однако выражена значительно слабее. Полученные данные подчеркивают важность температуры как основного фактора, определяющего эффективность воздействия модификатора.

Приведенные эксперименты показали также, что существует вполне определенный интервал оптимальных температур нагрева чугуна, когда наблюдается наибольшая эффективность процесса модифицирования. Известно, что повышение перегрева немодифицированного чугуна, увеличение выдержки в плавильной печи изменяют его химический состав и жидкое состояние (вязкость, поверхностное натяжение и т.д.), способствуют дегазации, рафинированию сплава. В модифицированном чугуне имеет место вполне определенная закономерность изменения такого критерия эффекта модифицирования, как степень измельчения эвтектического зерна: понижение температуры, при которой вводится модификатор, усиливает эффект модифицирования, способствуя измельчению эвтектических ячеек. Исключение составляет силикокальций, воздействие которого как модификатора с повышением температуры расплава до 1520°С, наоборот, несколько увеличивается.

Измельчая эвтектическое зерно, графитизирующие модификаторы ФС75, ФС60Ba22 и алюми-

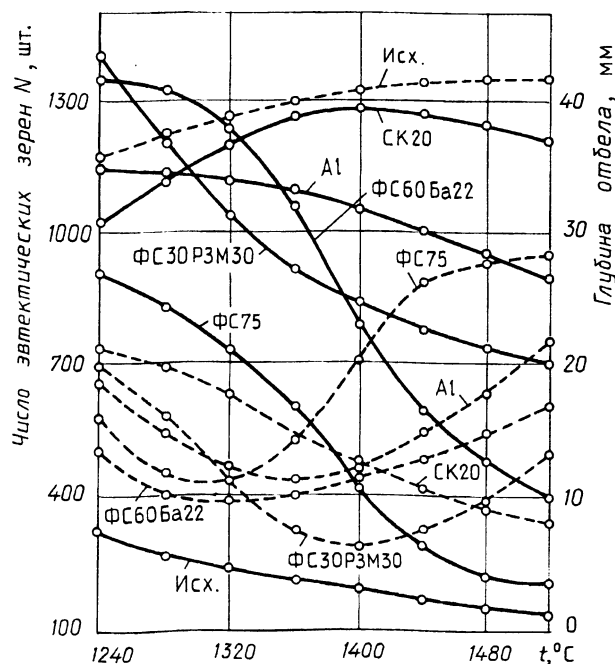


Рис. 1. Влияние температуры на эффект модифицирования чугуна 0,2% ФС75, СК20, ФС60Ba22, ФС30P3M30 и алюминия:

● — число эвтектических зерен, шт.;

○ — отбел, мм

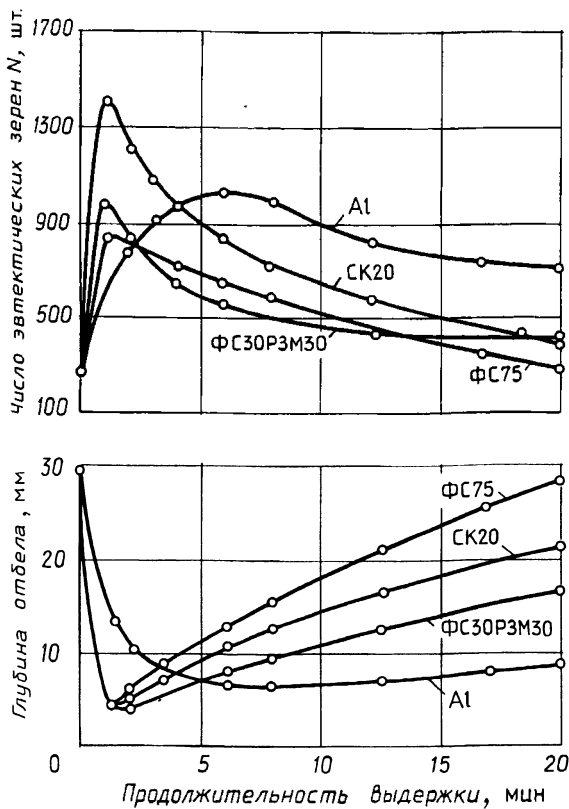


Рис. 2. Влияние продолжительности выдержки чугуна на основные параметры эффекта модифицирования (по 0,2% ФС75, Al, СК20 и 0,05% ФС30РЗМ30)

ний уменьшают отбеливаемость отливок в интервале температур 1280–1360°C, а редкоземельная лигатура ФС30РЗМ30 — в более широком интервале температур 1330–1460°C. При температурах модифицирования в указанных выше интервалах эффект воздействия добавок ослабевает и степень отбела увеличивается, однако не достигает при этом значений глубины отбела немодифицированного чугуна. Исключительным вновь является воздействие силикокальция. Его положительный эффект на уменьшение отбеливаемости чугуна отличается во всем интервале исследованных температур.

При определении рациональных технологических режимов модифицирования, гарантирующих максимальный эффект обработки и качество чугуна, большое значение имеет продолжительность эффекта модифицирования, т.е. его “живучесть”. Состав чугуна оставался прежним. Использовали модификаторы: по 0,2% ФС75, СК20, ФС60Ба22, алюминия и 0,05 % ФС30РЗМ30. Модифицирование чугуна производили непосредственно в индукционной печи. Температуру жидкого чугуна выдерживали постоянной (1400°C) через определенные промежутки времени (от 1 до 20 мин). Производили отбор проб для определения отбела и числа эвтектических зерен.

Как видно из рис. 2, указанные параметры эффекта модифицирования имеют тенденцию непрерывного уменьшения по мере увеличения продолжительности выдержки чугуна, начиная с мо-

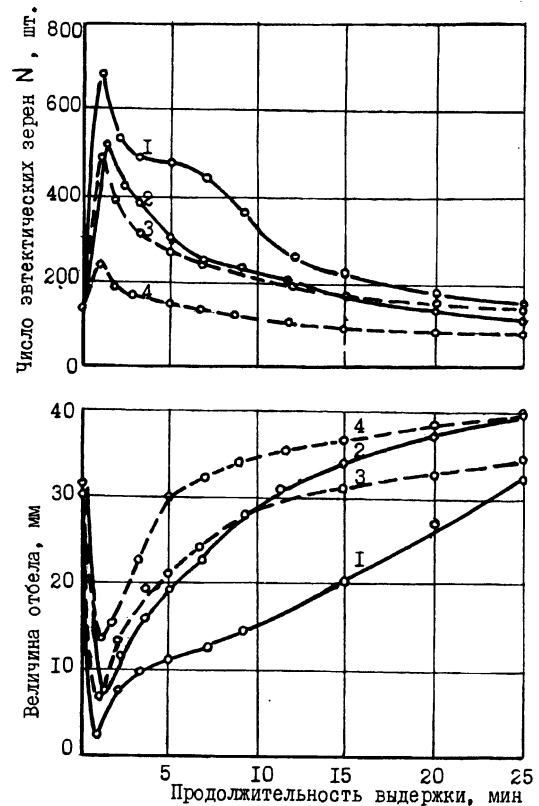


Рис. 3. Влияние продолжительности выдержки расплава и температуры расплава на эффект модифицирования чугуна 0,2% ФС75 и 0,2% ФС60Ба22: 1 — 1400°C, ФС60Ба22; 2 — 1450°C, ФС60Ба22; 3 — 1400°C, ФС75; 4 — 1450°C, ФС75

мента обработки его графитизирующими добавками. Достаточно высокая их эффективность отмечается в первые 5 мин выдержки. Интересно поведение алюминия, когда воздействие его в течение первых 5–7 мин резко возрастает, а затем несколько убывает, являясь значительным даже после 20 мин выдержки. Наиболее чувствительным к изменению эффекта модифицирования по сравнению с исходным чугуном является ферросилиций, затем ФС30РЗМ30 и силикокальций. После 20–25 мин выдержки качественные характеристики чугуна, модифицированного ФС75, СК20, ФС30РЗМ30, приближаются к показателям исходного немодифицированного чугуна. Особое положение занимает алюминий, что особенно заметно на стабильности полученных результатов по уменьшению глубины отбела. Она практически мало изменяется и остается весьма низкой по отношению к исходному чугуна в интервалах исследованных выдержек.

Некоторые исследователи в качестве особых преимуществ бариевых модификаторов отмечают их повышенную “живучесть” при модифицировании чугуна. Для выяснения данных утверждений были проведены сравнительные плавки чугуна, модифицированного добавками 0,2% ФС75 и 0,2% ферросиликобария марки ФС60Ба22 (рис. 3). Температура жидкого металла выдерживалась постоянной и равнялась соответственно 1400 и 1450°C в течение проведения эксперимента с каждым видом модификатора. Через определенные промежутки времени

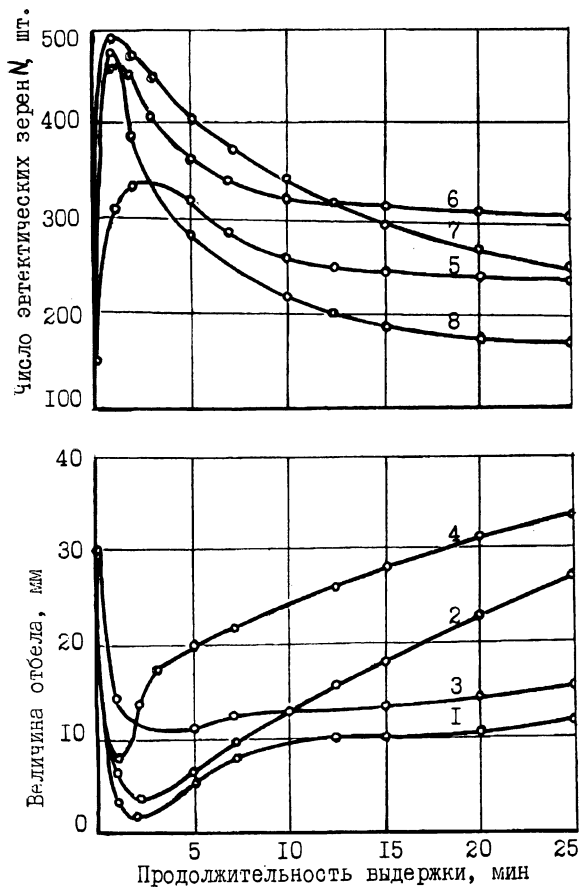


Рис. 4. Влияние продолжительности выдержки расплава при температуре  $1400^{\circ}\text{C}$  на число эвтектических зерен и величину отбела чугуна, модифицированного 0,2%  $\text{FC75}$  (4, 8); 0,1%  $\text{Al}$  (3, 5); 0,1%  $\text{Al}+0,2\%$   $\text{FC75}$  (1, 6); 0,06%  $\text{Al}+0,3\%$   $\text{FC75}$  (2, 7)

(от 1 до 25 мин) также производили отбор проб для определения отбела и числа эвтектических зерен. Из приведенных результатов следует, что при температуре модифицирования чугуна  $1400^{\circ}\text{C}$  и выдержке при этой температуре добавки 0,2%  $\text{FC60Ba22}$  по сравнению с аналогичными добавками  $\text{FC75}$  показали большее увеличение числа эвтектических зерен и уменьшение величины отбела. В обоих случаях максимальный эффект модифицирования наблюдается через 1 мин после ввода добавок, затем резко снижается. Однако при добавке  $\text{FC60Ba22}$  в течение последующих 5 мин наклон кривых изменения числа эвтектических зерен и величины отбела снижается, что свидетельствует о некотором увеличении продолжительности его действия по сравнению с добавками  $\text{FC75}$ . Затем идет непрерывное снижение эффекта модифицирования указанных добавок и примерно через 20–25 мин он полностью исчезает. Выдержка в жидком состоянии после модифицирования  $\text{FC75}$  и  $\text{FC60Ba22}$  при температуре  $1450^{\circ}\text{C}$  показала резкое снижение эффекта модифицирования в обоих случаях, при этом увеличение числа эвтектических зерен и уменьшение величины отбела имеют более высокие значения при модифицировании  $\text{FC60Ba22}$ , чем  $\text{FC75}$ .

Таким образом, при определенных (оптимальных) температурах выдержки в жидком состоянии

после модифицирования ( $1400^{\circ}\text{C}$ ) наблюдается некоторое увеличение “живучести”  $\text{FC60Ba22}$ . При более высоких температурах ( $1450^{\circ}\text{C}$ ) выдержки чугуна после модифицирования продолжительность действия  $\text{FC60Ba22}$  мало отличается от продолжительности действия  $\text{FC75}$ .

На основании полученных данных была поставлена задача реализации возможности создания графитизирующих модификаторов с большей продолжительностью действия.

На рис. 4 показаны результаты сравнительных исследований влияния продолжительности выдержки чугуна при температуре  $1400^{\circ}\text{C}$  на число эвтектических зерен и величину отбела чугуна, модифицированного 0,1%  $\text{Al}$  (кривые 3, 5), 0,2%  $\text{FC75}$  (кривые 4, 8), смесей 0,1% $\text{Al}+0,2\%$   $\text{FC75}$  (кривые 1, 6) и 0,06% $\text{Al}+0,3\%$   $\text{FC75}$  (кривые 2, 7). Во всех случаях эффект модифицирования имеет тенденцию непрерывного уменьшения по мере увеличения продолжительности выдержки чугуна. Достаточно высокая эффективность отмечается в первые 5 мин выдержки. Воздействие алюминия в течение первых 5–7 мин резко возрастает, а затем несколько убывает, являясь значительным даже после 25 мин выдержки. В этом же направлении, но более эффективно действует добавка 0,1% $\text{Al}+0,2\%$   $\text{FC75}$ . Добавки 0,06% $\text{Al}+0,3\%$   $\text{FC75}$  также обеспечивают более значительное по сравнению с единичными добавками  $\text{Al}$  и  $\text{FC75}$  увеличение числа эвтектических зерен, уменьшение величины отбела при достаточно высокой “живучести”.

В практике модифицирования, как известно, важной проблемой является стабилизация модифицирующего эффекта, который тесно связан с изменением жидкого состояния чугуна. Факторы, определяющие жидкое состояние чугуна, весьма многочисленны и не всегда поддаются учету. К ним относятся состав и структура шихтовых материалов, тип плавильного агрегата, режим плавки, внепечная обработка металла и т.п. Их воздействие на жидкое состояние проявляется главным образом в изменении числа потенциальных зародышей в виде неметаллических включений или их комплексов, играющих роль центров графитизации при кристаллизации чугуна. В свою очередь эффективность зародышевых центров также обусловлена рядом факторов, среди которых выделяют критический размер первичных зародышей, соответствие их кристаллического строения графиту, температуру плавления, удельный вес и т.д.

Таким образом, при рассмотрении и объяснении причин, изменяющих эффективность воздействия модификаторов в условиях перегрева или длительной выдержки при постоянной или понижающейся температуре чугуна, следует выделить в первую очередь вопрос активности зародышевых центров. При объяснении модифицирующего эффекта принимают во внимание три основные теории образования графитовых, карбидных или

оксидных зародышей, не исключая участия нитридов, сульфидов и других в образовании потенциальных или активных зародышей. Считают, что модифицирующий эффект связан с существованием в чугунах в течение достаточно длительного времени нерастворившихся графитных комплексов, которые могут служить зародышами при кристаллизации. Зародышевое действие карбидов основано на предположении, что при высоких температурах они диссоциируют и облегчают образование зародышей графита. По теории оксидных зародышей частицы оксида кремния в виде самостоятельных включений или как составляющие различных фаз принимают участие в образовании зародышей.

Связь между перегревом, длительностью выдержки чугуна, графитообразованием, уменьшением числа эвтектических зерен и отбелом обусловлена характером происходящих в жидком чугуна металлургических реакций. Известно [1], что температура расплава и продолжительность его выдержки изменяют растворимость кислорода в жидком чугуна и этим определяют характер протекаемых реакций: окислительных или восстановительных. При пониженных температурах протекают окислительные реакции и выпадает кремнезем  $[\text{Si}] + 2[\text{O}] \leftrightarrow (\text{SiO}_2)$ , который играет исключительную роль в процессе зародышеобразования графитной фазы. В выдержанном при температуре перегрева чугуна протекает кремневосстановительная реакция  $(\text{SiO}_2) + 2[\text{C}] \leftrightarrow [\text{Si}] + 2\{\text{CO}\}$  и резко снижается содержание растворенного кислорода. Последнее означает почти полное удаление оксидов кремния

из расплава, следовательно, значительное уменьшение склонности к графитообразованию.

Таким образом, рафинированный чугун обладает меньшей восприимчивостью к проявлению модифицирующего эффекта, что приводит к увеличению склонности к отбелу и увеличению размеров эвтектического зерна [2].

Алюминий, вводимый в жидкий чугун как модификатор или в составе кремнийсодержащих ковшевых добавок, взаимодействует с дисперсными оксидными включениями по реакции  $(\text{SiO}_2) + 4[\text{Al}] \leftrightarrow 2(\text{Al}_2\text{O}_3) + 3[\text{Si}]$ . Частицы восстановленного кремния и комплексные алюмосиликатные соединения, полученные в результате реакции, образуют локально насыщенные кремнием микрообъемы, повышают активность углерода и стимулируют выделение первичного графита.

Таким образом, стабильность эффекта модифицирования в условиях длительной выдержки при постоянной или переменной температуре взаимосвязана с активностью зародышевых центров и характером протекаемых во времени металлургических реакций, способствующих рафинированию жидкого чугуна и снижению эффекта модифицирования. Увеличение продолжительности действия модифицирующих добавок связано с введением в жидкий чугун компонентов, способствующих образованию более устойчивых активных зародышей.

### Литература

1. Высококачественные чугуны для отливок / Под ред. Н. Н. Александрова М.: Машиностроение, 1982.
2. Шевчук Л. А. Структура и свойства чугуна. М.: Наука и техника, 1978.