

05.16.04
Б 204

На правах рукописи

Балинский Станислав Вацлович

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ГРАФИТИЗАЦИИ ЧУГУНА
С КОМПАКТНЫМ ГРАФИТОМ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИСХОДНЫХ
ПАРАМЕТРОВ РАСПЛАВА**

Специальность 05.16.04 – «Литейное производство»

**Автореферат
на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Диссертация выполнена на кафедре «Литейное производство» Южно-Уральского государственного технического университета.

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор

Кулаков Б.А.

Научный консультант

доктор технических наук, с.н.с.

Цепелев В.С.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Смолко В.А.,

кандидат технических наук

Московенко А.М.

Ведущая организация – ОАО «Уральский автомобильный завод», г. Миасс.

Защита состоится « 26 » мая 2000г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 053.13.08 в Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ученый совет.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью присылать по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

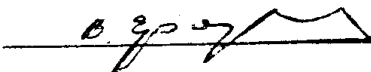
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан « » 2000г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, профессор



/В.В. Ерофеев/

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современное машиностроение предъявляет все более высокие требования к литейным сплавам, среди которых особое место занимает чугун, как самый распространенный и дешевый конструкционный материал.

Интерес к чугуну значительно возрос с развитием практики его модифицирования. Если еще недавно целью модифицирования было некоторое повышение однородности структуры и механических свойств, то в настоящее время методами модифицирования решаются целые комплексы вопросов, в том числе получения чугунов с компактным графитом – чугун с шаровидным графитом (ЧШГ), чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ).

Несмотря на чрезвычайную важность применения новых марок чугунов с повышенными механическими характеристиками, их использование в нашей промышленности тормозится из-за нестабильности получаемых результатов модифицирования, вследствие низкого качества и нестабильности шихтовых материалов и модификаторов.

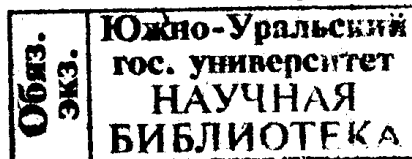
Хотя большое количество научных работ посвящено изучению влияния сфероидизирующих элементов на графитизацию, многие теоретические аспекты этих процессов до настоящего времени остаются не раскрытыми и спорными.

Повышение качества чугуна невозможно без углубленного изучения природы расплавов, механизма наследования шихтовых материалов. Сведения, имеющиеся в литературе о форме существования углерода в расплавах, крайне противоречивы. В то же время состояние исходного расплава, значение его физических свойств влияют на процесс структурообразования. Поэтому необходимо разрабатывать приемы для формирования наиболее благоприятного состояния расплава, обеспечивающего при неизменном химическом составе наилучшие свойства твердого чугуна.

Диссертационное исследование выполнено в соответствии с научно-технической программой Министерства образования РФ «Новые ресурсосберегающие металлургические технологии», 1994 – 1997 г.

Цель работы: установление особенностей процесса графитизации чугуна в зависимости от параметров расплава, компонентов модификаторов, различных видов шихты и разработка режима подготовки расплава к модифицированию. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- изучить свойства отливок из чугуна, выплавленного на различных шихтовых материалах и обработанного различными количествами сфероидизирующих элементов;
- исследовать временные и температурные зависимости кинематической вязкости, поверхностного натяжения и плотности высокоуглеродистых расплавов, характеризующие равновесное или неравновесное состояние системы;



- изучить поведение графитных включений в расплаве чугуна при его высокоскоростном нагреве и охлаждении;
- определить влияние термовременной обработки (ТВО) расплава чугуна на его структуру, механические свойства, на процесс модифицирования;
- разработать практические рекомендации по методике подготовки расплава чугуна к процессу его модифицирования.

Научная новизна работы. Экспериментально и теоретически обоснованы положения и рекомендации, позволяющие выявить особенности процесса графитизации чугуна и управлять им при получении отливок. В том числе:

- установлено влияние исходных шихтовых материалов и количества модификаторов на структуру графитных включений и свойства чугунов;
- получены данные по осциллирующему характеру временных зависимостей поверхностного натяжения и плотности расплавов чугунов, выявлен немонотонный характер температурных зависимостей их вязкости, что свидетельствует о неравновесном состоянии расплавов в течении длительного времени;
- установлено наличие положительного гистерезиса в политермах кинематической вязкости расплава чугуна при нагреве выше 1450°C, при этом величина раскрытия гистерезиса может служить мерой оценки приближения расплава к равновесному состоянию;
- разработана специальная установка высокоскоростного нагрева и охлаждения чугунов для оценки поведения графитных включений в их расплавах, позволяющих оперативно определить критические точки чугуна. Установлена критическая температура, превышение которой приводит расплав в равновесное состояние;
- дана оценка влияния ТВО расплава чугуна с учетом процесса модифицирования на его структуру и механические свойства в твердом состоянии, на качественное и количественное состояние графитных включений, подтверждена связь жидкого и твердого состояний чугуна;
- разработаны критерии подготовки расплава чугуна к модифицированию.

Практическая ценность работы состоит в том, что результаты комплексного исследования структуры и свойств высокоуглеродистых расплавов в жидком и твердом состояниях, процесса их модифицирования позволили найти оптимальные технологические решения, которые были опробованы в литейных цехах Уральского автозавода:

- технологические рекомендации по подготовке расплава чугуна к процессу его сфероидизирующего модифицирования;
- технологию получения отливок из серого чугуна с высокой прочностью за счет перегрева и модифицирования в форме.

Исследование выполнено на кафедре «Литейного производства» ЮУрГУ. Экспериментальная часть работы проведена на опытно-промышленном участке ОАО «УралАЗ», в лабораториях Института физики металлических жидкостей УГТУ-УПИ, лабораториях Миасского филиала ЮУрГУ.

Апробация работы. Основные результаты доложены и обсуждены на III Республиканской научно-технической конференции «Неметаллические включения и газы в литейных сплавах» (1982г.), г. Запорожье, Украина; на научно-технической конференции «Новые металло- и трудосберегающие технологические процессы в литейном производстве» (1984г.), Челябинск; на научно-техническом семинаре «Улучшение качества металла и его экономия за счет применения новых модификаторов для серого и высокопрочного чугуна» (1984г.), Челябинск; на республиканской научно-технической конференции «Физико-химия металлических и оксидных расплавов» (1993г.), Екатеринбург; первой Уральской школе-семинаре металловедов-молодых ученых (1999г.), Екатеринбург.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 статей и тезисов докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, основных выводов, библиографического списка из 123 наименований. Изложена на 124 страницах машинописного текста, содержит 43 рисунка и 21 таблицу.

Личный вклад автора. В данной работе представлены результаты, полученные автором самостоятельно, а также совместно с сотрудниками кафедры «Литейное производство» Южно-Уральского государственного технического университета и кафедры физики Уральского государственного технического университета. При этом автору принадлежит постановка цели и задач исследования, организация и проведение опытных плавов, исследование образцов и отливок (металлографические и прочие), сконструирована и изготовлена установка высокоскоростного охлаждения.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы, определяется цель исследования, формулируются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основании анализа литературных данных сделан критический обзор процесса графитизации высокопрочного чугуна. Рассмотрены типичные формы графита в чугунах и основные факторы, влияющие на формообразование графита.

Проанализированы литературные данные о роли наследственности шихтовых материалов в процессе графитизации чугунов, которые сложны и противоречивы.

Рассмотрены особенности изменений строения высокоуглеродистых расплавов под влиянием температуры. Констатируется, что накопленные к настоящему времени экспериментальные данные об аномалиях, перегибах, скачках и гистерезисе на поллитерах физических свойств свидетельствуют о сложности процессов изменения структурного состояния расплавов при их нагреве.

Наиболее простыми и эффективным энергетическим способом воздействия на неравновесный расплав является его термовременная обработка. Положительный эффект ТВО проявляется в получении равновесной, стабильной структуры расплава, устранении влияния исходных шихтовых материалов и, в конечном итоге, улучшения качества готовой металлопродукции.

Сделаны выводы, что существующие данные не достаточны для понимания всех причин и факторов, обуславливающих процесс графитизации, среди которых особое место занимают:

- наследственность шихтовых материалов;
- химический состав чугуна и модификаторов;
- жидкое состояние расплава чугуна и его ТВО.

Во второй главе изложены результаты экспериментального исследования особенностей влияния компонентов модификаторов и различных видов шихты на сфероидизацию и механические свойства чугуна.

Для опытных плавов использовалась шихта из чугуна ПЛ2 Магнитогорского металлургического комбината, возврата серого чугуна ваграночной плавки, синтетического чугуна, выплавленного из стального лома, боя графитизированных электродов и ферросилиция, армко-железа, ферросплавов, горючей серы. Использовались модификаторы ФСМg9, ФСМg7, ФСМg2, лигатура NiMg, ферроцерий, силикокальций, ФС75Л, ФС65Ba1. Плавку проводили в печи ИСТ-0,16, модифицировали при температуре чугуна 1350...1400°C, температуру контролировали термопарой ППР. Чугун в ковше емкостью 15 кг подвергали фракционному модифицированию, контролировали склонность к отбелу по клиновой пробе, механические свойства на образцах диаметром 30 мм, у которых также проверяли твердость и микроструктуру. Проведено более 30 плавов состава 2,8...3,7% С, 2,3...2,8% Si, 0,2...0,7% Mn, 0,03...0,12% P, 0,08...0,10% Cr, 0,012...0,12% S. С учетом фракционной разливки проведено свыше 250 вариантов модифицирования чугуна на различных видах шихты.

Установлено, что небольшие добавки магния (остаточное содержание магния до 0,01%) и ферроцерия (до 0,06% массы жидкого чугуна) уменьшают переохлаждение при затвердевании, существенно снижают склонность чугуна к отбелу, как при низком содержании серы (0,012...0,018%), так и более высоком (0,05...0,12%). Размер графитных включений увеличивается, и они приобретают форму прямолинейных утолщенных пластин.

При увеличении добавок магния и церия увеличиваются степень переохлаждения, склонность к отбелу, уменьшается скорость графитизации, количество эффективных зародышей графита, что приводит к образованию розеток графита – ветвистых включений, растущих из единого центра. Кристаллизация начинается с образования дендритов аустенита, а графит образуется в междендритном пространстве, что приводит к его измельчению и к появлению междендритного графита переохлаждения. Розеточный графит вначале соседствует, а затем полностью заменяется междендритным.

При содержании остаточного магния 0,01...0,014% и ферроцерия 0,07...0,08% от массы жидкого чугуна проявляется их сфероидизирующее действие на графит и тогда, наряду с междендритным пластинчатым графитом, образуется псевдопластинчатый (коралловидный) графит. Он также сильно разветвлен, как и междендритный, но с закругленными ветвями пластин. Склонность к отбелу при этом возрастает.

При дальнейшем увеличении содержания магния 0,015...0,020% и ферроцерия 0,08...0,09% происходит усиление сфероидизирующего эффекта, который приводит к образованию вермикулярного графита. Вермикулярный графит растет из шаровидных зародышей, образующихся в жидком чугуне. Вырождение шаровидного графита происходит в результате формирования на его поверхности графитных ответвлений, растущих в контакте с расплавом. По механизму роста вермикулярный графит представляет смесь двух форм графита, пластинчатого и шаровидного. Одновременно с вермикулярным образуется и шаровидный графит. При большем содержании магния и церия происходит полная замена вермикулярного на шаровидный графит. Таким образом, выявлена последовательность изменения форм графита по мере увеличения вводимых магния:

- исходный, немодифицированный чугун – графит пластинчатый, размер 90 мкм, имеются небольшие зоны с междендритным графитом;
- при содержании менее 0,01% остаточного магния – графит правильной пластинчатой формы, пластины утолщаются, появляются зоны с розеточным графитом, прочность чугуна возрастает на 10...20 МПа;
- при содержании 0,01...0,014% остаточного магния – пластинчатый, розеточный, междендритный графит. С увеличением доли междендритного графита количество феррита в структуре растет;
- коралловидный, псевдопластинчатый графит;
- при содержании более 0,015% остаточного магния – вермикулярный графит, при дальнейшем увеличении магния появляется шаровидный, количество которого равномерно увеличивается. Прочность чугуна достигает 400 МПа и выше, склонность к отбелу увеличивается.

Изменение формы графита показано на рис. 1.

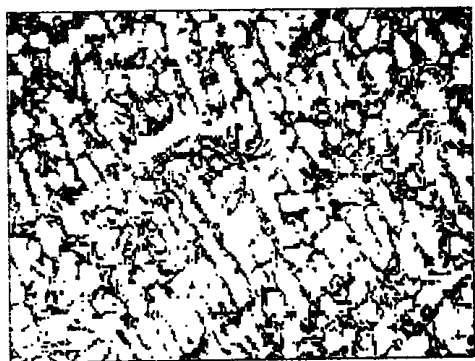
При модифицировании чугуна с повышенным содержанием серы дополнительные переходные формы графита не выявлены. При модифицировании чугуна с разным количеством марганца 0,07...0,35% и введение в расплав олова до 0,1% не выявлено их влияния на изменение формы графита.



а



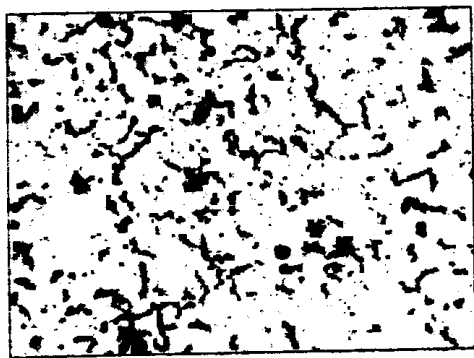
б



в



г



д



е

Рис.1. Структура графита. Увеличение $\times 100$:

а – пластинчатый графит; б – розеточный графит; в – междендритный графит;
г – коралловидный, псевдопластинчатый графит; д – вермикулярный графит;
е – шаровидный графит

При модифицировании чугуна, выплавленного на синтетическом чугуне та же последовательность изменения форм графита достигается при более высоком содержании остаточного магния (примерно на 10%), что может объясняться более высоким содержанием микропримесей в стальном ломе. Было проверено содержание некоторых примесей в чугуне ПЛ2 Магнитогорского металлургического комбината и синтетическом чугуне, полученном на основе стального лома: содержание свинца в ПЛ2 $3 \times 10^{-4}\%$, в синтетическом чугуне $(15...30) \times 10^{-4}\%$; содержание цинка $6 \times 10^{-4}\%$ и $(18...20) \times 10^{-4}\%$, меди 0,02...0,03% и 0,05...0,08% соответственно.

Таким образом, при разработке технологии сфероидизирующего модифицирования необходимо учитывать тип шихты, содержание микропримесных элементов, количество и состав модификатора.

Третья глава посвящена описанию конструкций установок и методик исследования физических свойств расплавов чугуна, а так же анализу экспериментальных данных.

Определение кинематической вязкости высокоуглеродистых расплавов проводилось методом затухающих колебаний тигля с расплавом в интервале температур 1300...1900°C путем измерения логарифмического декремента затуханий колебаний подвесной системы.

Установка позволяла производить в автоматическом режиме процессы управления и контроля температурного режима, а также проведения измерений и обработки результатов, что значительно оптимизировало эксперимент и положительно сказывалось на точности его результатов.

Для определения плотности и поверхностного натяжения расплавов чугунов в работе использован метод «большой капли», в котором реализован способ принудительного формирования капли металла на подложке. Эксперименты проводились в высокотемпературной установке горизонтального типа в интервале температур 1300...1900°C. Каплю металла проецировали на матовое стекло, размещенное на специальном столике. С помощью двух высокоточных датчиков измеряли необходимые параметры капли металла и по ним вычисляли плотность и поверхностное натяжение расплава. Измерение размеров капли металла непосредственно на экране оптической системы позволило повысить точность эксперимента и обеспечить экспрессность данного метода.

Химический состав изученных в работе образцов чугуна был следующим: 3,4...4,5%С, 0,8...1,7%Si, 0,2...0,4%Mn, 0,05...0,09%Cr, 0,06...0,07%P, 0,02...0,03%S.

При анализе экспериментальных данных, полученных в результате исследования изменения плотности d и поверхностного натяжения σ высокоуглеродистых расплавов в процессе изотермической выдержки была установлена их аналогичность материалам, изложенным ранее в научной литературе, где подобные изменения свойств идентифицируются как затухающие колебания, осложненные дополнительными гармониками-помехами. Однако в данном случае колебания не затухали в течении трех и более часов. Характерная зависимость поверхностного натяжения расплава чугуна от времени изотермической выдержки приведе-

на на рис.2. Период колебаний значений плотности и поверхностного натяжения составляет 10-20 мин., амплитуда колебаний плотности – около 3%, поверхностного натяжения (7...10)% от средних значений.

Подобные колебания физических величин и характеристик наблюдаются в неравновесных системах и являются объектами изучения необратимых процессов. В нашем случае неравновесное состояние системы (квазиравновесие) поддерживалось стационарными внешними условиями. При этом в нелинейной области система может освобождаться от избыточной энергии путем формирования стационарной диссипативной структуры подобно ячейкам Бернара, когерентному излучению лазера и т.п. Однако возможно возникновение и не стационарных, а периодически возникающих и исчезающих диссипативных структур, отличающихся от исходной только лишь степенью порядка, т.е. энтропией. Понятие диссипативной структуры включает в себя, в частности, периодические пространственно-временные образования типа автоколебаний.

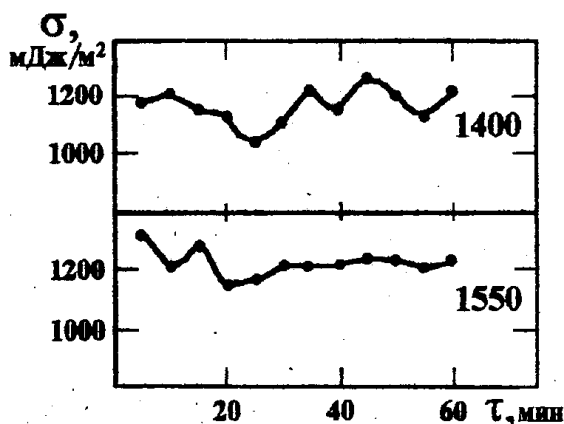


Рис.2. Зависимости поверхностного натяжения чугуна от времени выдержки

Таким образом, данные об осциллирующем характере релаксации высокоуглеродистых расплавов не только не противоречат основным положениям неравновесной термодинамики, но и могут быть качественно описаны в рамках теории неравновесных процессов.

При исследовании политерм поверхностного натяжения $\sigma(t)$ и кинематической вязкости $\nu(t)$ расплавов чугуна были выявлены некоторые особенности, а именно: гистерезис и критическая температура.

Политермы свойств многокомпонентных металлических расплавов сильно отличаются от политерм чистых металлов. Они почти никогда не бывают монотонными, а тем более линейными. Для любого чугуна температурные зависимости свойств имеют собственный (хотя и подобный) вид, определяемый химическим составом, исходными материалами и спецификой производства.

На рис.3. приведены политермы поверхностного натяжения $\sigma(t)$ и кинематической вязкости $\nu(t)$ исследуемых образцов. Политермы поверхностного натяжения характеризуются наличием гистерезиса, т.е. несовпадением ветвей нагрева и охлаждения. Нагрев всех образцов сопровождается нелинейным ростом σ . Это свидетельствует о происходящем распаде крупных атомных группировок и растворении частиц графита. Заметим, что σ чистых металлов, истинных расплавов и структурно-устойчивых жидкостей понижается с ростом температуры.

Политермы кинематической вязкости $\nu(t)$ образцов также характеризуются наличием гистерезиса. Вязкость исходного расплава оказалась ниже, чем перегретого, что обусловлено присутствием в исходном расплаве, кроме включений нерастворившегося графита, сравнительно крупных комплексов разноименных атомов не только типа FeSi, FeMn и т.п., но и значительно более сложных, сильные межатомные связи которых локализованы внутри комплексов и не принимают участие в вязком течении.

В ходе нагрева образца сложные комплексы диссоциируют. Судя по виду политерм $\sigma(t)$ и $\nu(t)$ эти процессы начинаются при 1300°C , интенсивно протекают при 1400°C , но завершаются при температуре не ниже 1530°C . Лишь нагрев до этой температуры и выше приводит при последующем охлаждении к максимальному гистерезису и к получению истинного раствора углерода и других элементов в железе. Это так называемая, критическая температура.

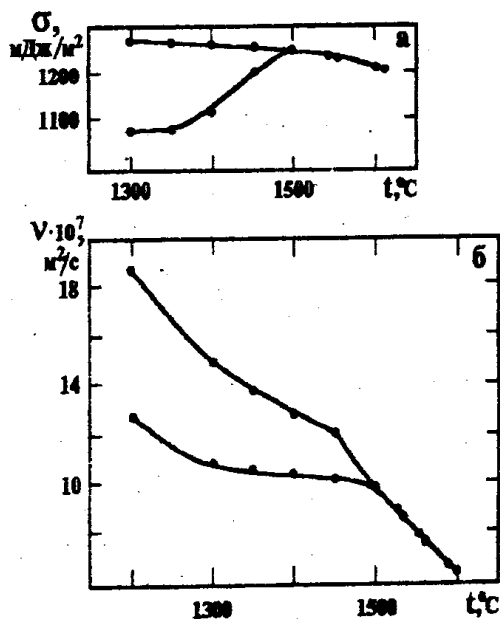


Рис.3. Усредненные политермы поверхностного натяжения (а) и кинематической вязкости (б) образцов: ● – нагрев, ○ – охлаждение

Нагрев расплава чугуна необходимо проводить до критической температуры t_k , определяемой путем анализа вида температурных зависимостей физических свойств расплава. Критической является та минимальная температура, нагрев до которой ликвидирует все неравновесные структурные микрообразования в чугуне, унаследованные от исходных шихтовых материалов. Подобный нагрев и выдержка не только ликвидируют влияние предыстории, но и главное, обеспечивают формирование истинного раствора углерода и других элементов в железе. Для исследованных чугунов $t_k=1490...1530^\circ\text{C}$. Увеличение времени выдержки τ при $t=t_k$ эквивалентно повышению температуры выше t_k . Перевод расплава в равновесное состояние осуществляют, чаще всего, нагревом до критических температур. При их достижении энергия теплового движения частиц расплава становится соизмеримой с энергией разрыва наиболее прочных межатомных взаимодействий в неравновесных атомных ассоциациях. Тепловое движение разрушает их, расплав теряет частично свою наследственность.

В четвертой главе излагаются результаты изучения поведения графитных включений в чугуне при быстром нагреве до высоких температур и высокоскоростном охлаждении.

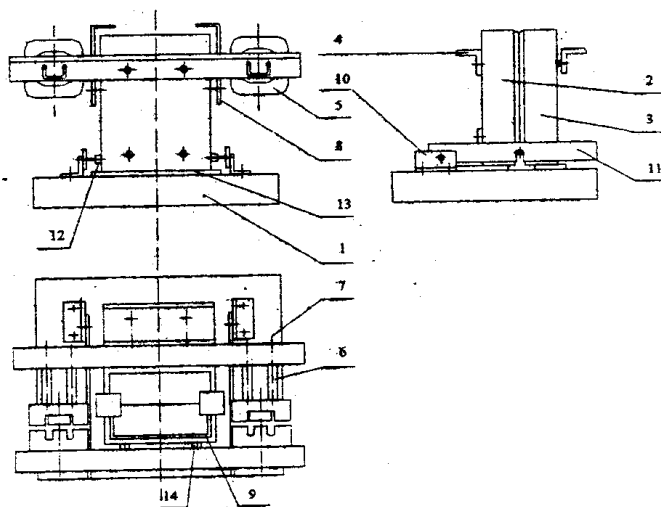


Рис.4. Общий вид установки ВОРЧ:

- 1 – основание; 2 – неподвижная изложница; 3 – подвижная изложница;
- 4 – кронштейн крепления электромагнита; 5 – электромагнит; 6 – пружина;
- 7 – винт регулировочный; 8 – пластина защитная; 9 – стеклоткань;
- 10 – кронштейн рычага фиксации; 11 – рычаг фиксации;
- 12 – цапфа подвижной изложницы; 13 – пластина (текстолит);
- 14 – шайба изоляционная

С этой целью создана система быстрого нагрева и высокоскоростного охлаждения расплава чугуна (ВОРЧ). Быстрый нагрев достигается в индукционном нагревателе ВЧИ-10/0,44-ПГ-ЛР1, с выходной мощностью 10 кВт, высокоскоростное охлаждение – в специально разработанной и изготовленной установке высокоскоростного охлаждения чугуна (ВОРЧ). В ней высокая скорость охлаждения достигается расплющиванием капли жидкого чугуна между двумя изложницами – молотом и наковальней, облицованными медными пластинами толщиной 30 мм

Навеска испытуемого чугуна, массой 50 г, в магнетитовом тигле с отверстием $\varnothing 5$ мм в боковой стенке, помещается в индукционный нагреватель. После расплавления металла тигель с жидким чугуном вынимается из нагревателя, при наклоне тигля вытекает капля чугуна, которая попадает в щель между пластинами, замыкает электрическую цепь установки ВОРЧ. Электромагниты приводят в действие молот, который мгновенно расплющивает каплю в пластинку, регулируемой толщины (в опытах – 0,3 мм) (рис.5).

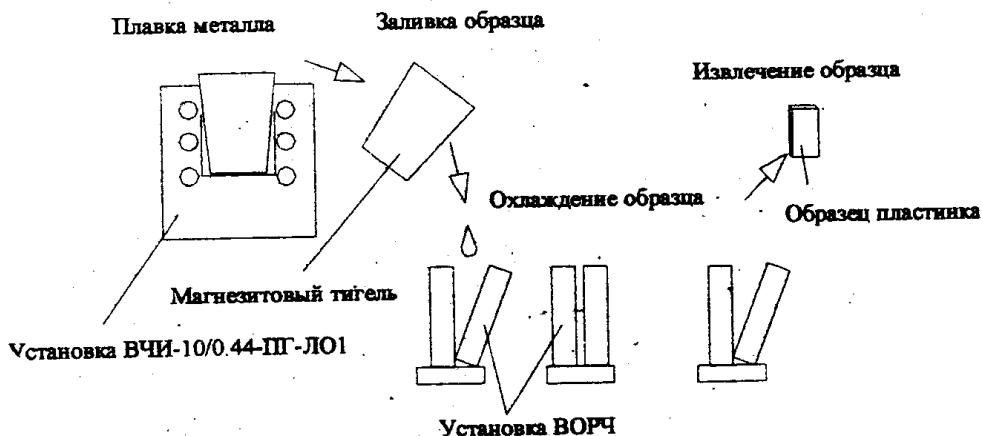


Рис.5. Технологическая схема изготовления образца

Нагрев небольшой массы чугуна происходит очень быстро. Поскольку перед заливкой капли в установку тигель с чугуном извлекается из индуктора, замер температуры чугуна в этот момент крайне затруднен. При постоянной мощности нагрева, электрических параметрах установки, постоянной массы чугуна близкого состава, постоянной массы тигля, температура чугуна определяется временем нагрева. Для определения изменения температуры чугуна во время нагрева проведены контрольные плавки – в них без извлечения тигля фиксировались температура чугуна и время нагрева. Температура измерялась термопарой

ПП, регистрировалась электронным потенциометром А682-002-01, время фиксировалось секундомером. Регистрацию температуры и времени начинали с момента видимого расплавления чугуна в тигле. Опытным путем было установлено, что нагрев чугуна до 1600°C протекает со скоростью 40°C/с., а охлаждения на установке ВОРЧ составляет 10⁴°C/с.

Для изготовления образцов в печи ИСТ-0,16 из шихты на синтетическом чугуне, полученным переплавом стального лома, ферросилиция и боя графитизированных электродов, выплавляли чугун состава 3,73%С, 1,68%Si, 0,33%Mn, 0,35%Cr, 0,017%S. После нагрева до 1400°C и выдержки 20 мин. чугун отбирали в 15-килограммовый ковш, где производили сфероидизирующее модифицирование ФСМg2 (ТУ 14-5-134-86) в количестве 1,5% от массы жидкого чугуна. Из чугуна заливались образцы для контроля механических свойств, микроструктуры и для испытаний на установке ВОРЧ (массой 50 г).

Остаток чугуна в печи ИСТ-0,16 (около 140 кг) приводился в равновесное состояние по режиму: нагрев до 1600°C, выдержка 10-15 мин., охлаждение до 1400°C. 15 кг чугуна в разливочном ковше подвергали сфероидизирующему модифицированию, заливали образцы. Приведение чугуна в равновесное состояние, как указано ниже, – это термовременная обработка (ТВО).

Далее образцы из высокопрочного чугуна №1 (до обработки) и №2 (после обработки) испытывались на установке ВОРЧ при 1300, 1400, 1500 и 1600°C. Из полученных пластин изготавливали микрошлифы, которые исследовались на микроскопе «Neofot 21» при увеличении $\times 500$. На полученных снимках увеличение доводили до $\times 10000$ и определяли количество, величину неметаллических включений в поле зрения шлифа 6,5 \times 8 мкм. Размеры и количество включений показаны на рис.6.

Полученные результаты показывают, что при нагреве до 1600°C практически все, находящиеся в чугуне графитные включения растворяются, причем быстро – за секунды. При 1600°C в чугуне остаются лишь отдельные мелкие включения – вероятно это не включения графита, а оксиды или другие соединения, которые не растворяются при быстром нагреве. Термовременная обработка жидкого чугуна уменьшает величину включений.

Установка ВОРЧ позволяет изучать поведение графитных включений в чугуне при его нагреве, определять температуру перехода расплава чугуна в равновесное состояние. Установка может найти применение в лабораториях институтов и крупных заводских лабораториях для исследований свойств чугуна.

В пятой главе излагаются результаты исследований термовременной обработки (ТВО) на свойства и структуру чугуна следующего состава: 3,5...3,9%С, 1,5...2,0% Si, 0,2...0,5% Mn, 0,01...0,03% S, как до, так и после сфероидизирующего модифицирования. Выплавленный чугун выдерживался при 1400°C, после чего заливались образцы до (1) и после (2) модифицирования (1,5% ФСМg2). Затем чугун в печи подвергали ТВО (нагрев до 1600°C, выдержка 10...20 минут), охлаж-

дали до 1400°C и заливали пробы из исходного (3) и модифицированного (4) чугуна (рис.7).

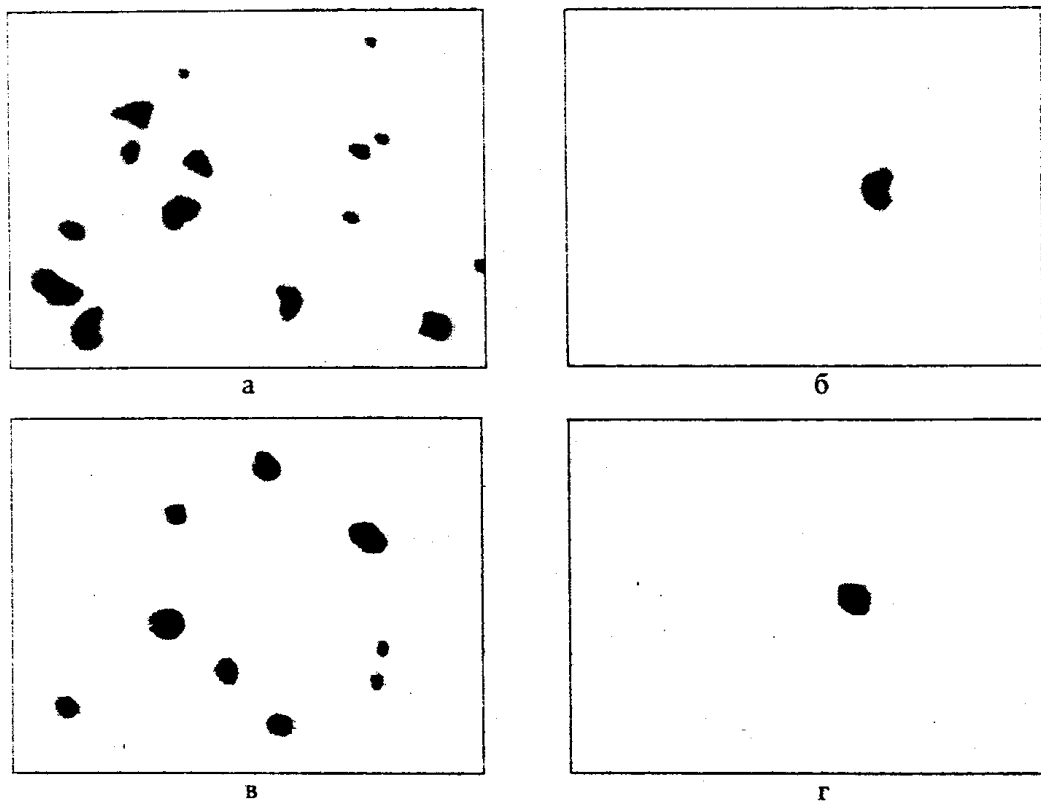


Рис.6. Неметаллические включения, $\times 10000$:

а – образец №1 (до обработки), 1300°C; б – образец №1 (до обработки), 1600°C; в – образец №2 (после обработки), 1300°C; г – образец №2 (после обработки), 1600°C

Результаты показали, что во всех случаях механические свойства (σ_B), как немодифицированного, так и модифицированного чугуна после ТВО увеличиваются примерно на 20 МПа, склонность к отбелу у немодифицированного чугуна увеличивается, после сфероидизирующего модифицирования – снижается. Изменение формы графита наблюдались следующие: немодифицированный чугун после ТВО – пластинки графита стали короче и тоньше; модифицированный после ТВО – глобулы графита становятся более округлыми, уменьшается количество мелких включений (рис.8).

Возможные причины этого явления – при ТВО за счет диффузии микропримеси демодификаторов распределяются более равномерно по объему чугуна и

нейтрализуются элементами-модификаторами, возможны реакции демодификации с другими элементами чугуна с удалением их в шлак.

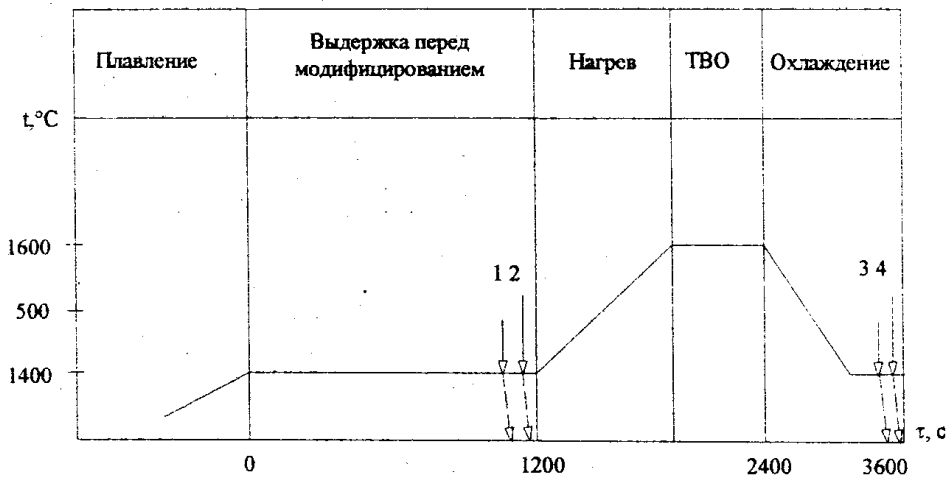


Рис. 7. Термограмма опытных плавок (обозначение в тексте)

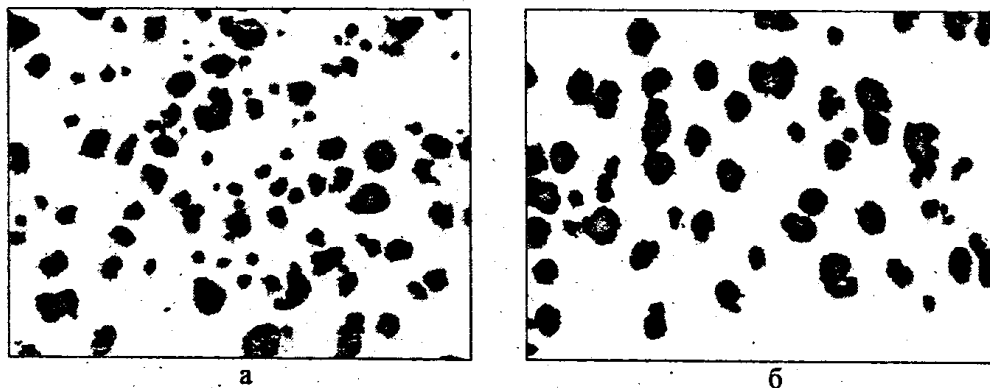


Рис. 8. Изменение формы шаровидных включений графита после ТВО, $\times 100$: а — до ТВО; б — после ТВО

Исследована микроликвация некоторых элементов в чугуне с переходными формами графита — от пластинчатой до компактной в УНЦ ЮУрГУ-ЧПИ и ИЦ ВЧ КАМАЗ по кремнию, титану, сере, висмуту, сурьме и олову. Исследуемые чугуны не подвергались ТВО. Результаты показали: распределение кремния по сечению равномерное, у графитных включений имеет место падение концентрации кремния; имеются микрозоны обогащенные титаном; на границе компактных и

некоторых пластинчатых включений графита отмечено повышение концентрации висмута и сурьмы. Таким образом, выявлена микроликвация элементов-демодификаторов, которая является причиной появления зон с переходными формами графита и вермикулярным графитом. ТВО уменьшая микроликвацию примесных элементов, обеспечивает более однородную структуру высокопрочного чугуна и, можно полагать, что проведение ТВО перед сфероидизирующим модифицированием, уменьшает расход модификатора.

Твердость и количество перлита в структуре немодифицированного и модифицированного чугуна практически не изменялось, так как они определяются содержанием марганца в чугуне и количеством стального лома в шихте. В одной из плавок после модифицирования до ТВО в структуре имелись участки с вермикулярным графитом, которые исчезали после ТВО и, соответственно, наблюдалось существенное повышение прочности.

На Уральском автозаводе для изготовления деталей двигателя воздушного охлаждения разработана технология изготовления отливок из чугуна СЧ35. Химический состав чугуна: 2,8...3,2%С, 1,3...1,8%Si, 0,6...1,0%Mn, 0,7...1,1%Sn.

Разработанная технология предусматривает:

- состав шихты: стальной лом, графит, до 10% литейного или пердедельного чугуна, собственный возврат, медь;
- ТВО: нагрев чугуна 1500...1530°C, выдержка 15-20 минут, охлаждение до температуры заливки;
- ковшевое модифицирование ФС65Ba1, а при низком углеродном эквиваленте дополнительно внутриформенное модифицирование ФСМg2;
- заливка форм при температуре чугуна 1400...1430°C.

Разработанная технология с использованием ТВО позволила получать в литых образцах $\sigma_b=350...410$ МПа и практически полностью устранить брак отливок по отбелу.

Таким образом, подготовка расплава (ТВО) повышает прочность матрицы твердого металла и изменяет форму графитных включений. ТВО и модифицирование позволяют существенно повышать прочность чугуна. В итоге введение модификатора в хорошо подготовленный расплав наиболее эффективно по сравнению с неподготовленным, неравновесным расплавом.

Основные выводы

1. Исследовано влияние модифицирования магнием и церием высокоуглеродистого расплава, изучены его свойства. Выявлено, что при содержании магния остаточного до 0,01% и введение церия до 0,06% от массы чугуна уменьшается переохлаждение при затвердевании и существенно снижается склонность чугуна к отбелу, как при низком содержании серы, так и более высоком. Размеры графитных включений увеличиваются и приобретают форму прямолинейных пластин.

2. Малые добавки сфероидизирующего модификатора оказывают графитизирующее действие на серый чугун, повышают его прочность на 5...10%. Особенно эффективно введение ФСМг₂, что не вызывает заметного пироэфекта и модификатор хорошо растворяется в чугуне. Повышение количества (до 0,01...0,014%) остаточного магния приводит к появлению наряду с пластинчатым междендритного и розеточного графита, что способствует выделению в структуре феррита. Прочность и твердость чугуна снижаются. Такой чугун не рекомендуется для промышленного применения.

3. Увеличение количества вводимых магнийсодержащих модификаторов (более 0,015% магния остаточного) или введение в чугун более 0,07% ферроцерия способствуют образованию компактных форм графита – вермикулярной и шаровидной. Склонность к отбелу, возрастает, прочность чугуна увеличивается до 400 МПа и выше. С повышением склонности к отбелу в структуре чугуна возникает цементит, для устранения которого в модификаторе должны присутствовать графитизирующие элементы или помимо лигатуры необходимо вводить графитизирующие модификаторы (ФС75, ФС65Ба1 и др.).

4. На образование компактных форм графита влияет состав шихты, из которой выплавлен чугун. Чугун, выплавленный из шихты на основе чугуна Магнитогорского металлургического комбината (ММК), требует меньшего расхода магния для получения компактных форм графита, чем чугун выплавленный на синтетическом чугуне (на стальном ломе). Таким образом, при подборе шихты следует учитывать ее наследственность, содержание примесных элементов. Установлено, что чугун ПЛ2 ММК содержит значительно меньше примесных элементов, чем синтетический чугун. Поэтому, с учетом опыта литейных цехов ОАО «УралАЗ», при выплавке чугуна с шаровидным графитом в качестве шихты рекомендуется чугун ММК.

5. При исследовании температурных и концентрационных зависимостей физических свойств расплавов железо-углерод обнаружен осциллирующий характер временных зависимостей поверхностного натяжения и плотности высокоуглеродистых расплавов. Выявлен немонотонный характер температурных зависимостей вязкости высокоуглеродистых расплавов, а также гистерезис политерм. Все это свидетельствует о возникновении и длительном существовании неравновесных состояний этих расплавов. Установлено наличие критической температуры, нагрев выше которой приводит к переводу расплава в равновесное состояние. Значение этой температуры зависит от химического состава высокоуглеродистого расплава. Для рассматриваемых чугунов она составляет 1490...1530°C.

6. Создана установка высокоскоростного нагрева и охлаждения расплава чугуна со скоростью нагрева 40°C/с, охлаждения - 10⁴°C/с. Установка дает возможность изучать поведение графитных включений в расплаве чугуна, быстро определять его критическую температуру. Испытание на установке исследуемого чугуна показало, что при нагреве до 1600°C в чугуне остаются лишь единичные неметаллические включения. Чугун переходит в равновесное состояние. При этом термовременная обработка чугуна дает повышение механических свойств

как до, так и после сфероидизирующего модифицирования. После модифицирования предел прочности на растяжение растет на 20 МПа.

7. Склонность к отбелу серого чугуна после ТВО несколько увеличивается, а после ТВО перед сфероидизирующим модифицированием уменьшается. Твердость серого чугуна после ТВО растет, а у чугуна с шаровидным графитом практически не меняется. Количество перлита в структуре отливок в данном случае, определяется содержанием марганца в чугуне, а также долей стального лома в шихте и снижается при применении сфероидизирующего модифицирования.

8. В микроструктуре чугуна, подвергнутого ТВО, наблюдаются изменения:
- в сером чугуне растворяются мелкие графитные включения, несколько укорачиваются пластинки графита;
 - в высокопрочном чугуне после модифицирования также растворяются мелкие глобулы графита, глобулы становятся более округлыми, исчезают микрозоны с вермикулярным графитом.

9. Установлена микроликвация элементов-демодификаторов, что является причиной появления микрозон с вермикулярным графитом. ТВО, уменьшая микроликвацию примесей, обеспечивает однородную микроструктуру высокопрочного чугуна, и поэтому с применением ТВО может быть снижено количество вводимого модификатора.

10. Рекомендуются подготовка расплава к сфероидизирующему модифицированию – это выбор шихты, с учетом ее наследственных свойств, и проведение ТВО, которая также повышает качество отливок из серого чугуна. Так для получения отливки «маховик» из СЧ35 двигателя воздушного охлаждения автомобиля «УРАЛ» достигнуты положительные результаты от применения ТВО.

Основное содержание диссертаций опубликовано в следующих работах:

1. Изосимов В.А., Балинский С.В., Шульте Г.Ю. Влияние содержания газов и микропримесей в доменных чугунах на качество чугунных отливок // Неметаллические включения и газы в литейных сплавах: Тезисы докладов III республиканской научно-технической конференции. – Запорожье, 1982. – С. 134 – 135.
2. Получение отливок из серого чугуна повышенной прочности для дизельного двигателя с воздушным охлаждением / В.Р.Балинский, В.А.Изосимов, С.В.Балинский, Н.Г.Милованов // Новые металло- и трудосберегающие технологические процессы в литейном производстве: Тезисы докладов научно-технической Уральской конференции. – Челябинск, 1984. – С. 5 – 6.
3. Балинский С.В., Изосимов В.А., Худокормов Д.Н. Модифицирование серого чугуна магнийсодержащими лигатурами // Улучшение качества металла и его экономия в литейном производстве за счет применения новых модификаторов для серого и высокопрочного чугуна: Тезисы докладов научно-технического семинара. – Челябинск, 1984. – С. 22 – 23.
4. Балинский С.В. Подготовка высокоуглеродистых расплавов к модифицированию // Физико-химия металлических и оксидных расплавов: Тезисы докладов

- Республиканской научно-технической конференции. – Екатеринбург, 1993. – С. 70.
5. Балинский В.Р., Балинский С.В. Получение высокопрочного чугуна на Уральском автозаводе // Вопросы теории и практики литейных процессов: Сборник научных трудов. – Челябинск, 1996. – С. 134 – 139.
 6. О влиянии подготовки расплава на эффективность модифицирования чугунов / В.С.Цепелев, Б.А.Баум, Г.В.Тягунов, и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1996. – №8. – С. 58 – 63.
 7. Балинский С.В., Кулаков Б.А., Дубенков П.В. Изучения состояния высокоуглеродистых расплавов // Проблемы проектирования неоднородных конструкций: Труды XVI Российской школы. – Миасс, 1997. – С. 163 – 167.
 8. Балинский С.В., Дубенков П.В., Кулаков. Б.А. Установкa высокоскоростного охлаждения расплава чугуна // Проблемы проектирования неоднородных конструкций: Труды XVI Российской школы. – Миасс, 1997. – С. 167 – 172.
 9. Influence of melt preparing to modifying on cast iron structure / V.S. Tsepelev, N.A. Zajtseva, E.E. Barishev, B.A. Baum, S.V. Balinsky // Engineering and functional materials. Theory, Technology, Ecology: Abstact of 2th International conference. – Lviv, Ukraine, 1997. – P. 18.
 10. Балинский С.В., Стусенко А.В. Переходные формы графита чугуна при сфероидизирующем модифицировании // Проблемы проектирования неоднородных конструкций: Труды XVII Российской школы. – Миасс, 1998. – С. 166 – 171.
 11. Влияние шихтовых материалов и подготовки расплава чугуна на структуру и свойства полученной отливки / С.В.Балинский, Л.Г.Савина, В.С.Цепелев и др. // Вестник УГТУ-УПИ: Первая Уральская школа–семинар металловедов–молодых ученых. – Екатеринбург, 1999. – С. 40 – 42.
 12. Балинский С.В., Балинский В.Р., Поносов А.Ю. Применение термовременной обработки и внутриформенного модифицирования при получении отливок из СЧ35 // Литейное производство. (В печати).
 13. Балинский С.В., Кулаков Б.А., Поносов А.Ю. Характер изменения неметаллических включений в расплаве чугуна // Литейное производство. (В печати).
 14. Балинский С.В., Кулаков Б.А., Кравченко Д.С. Особенности процесса модифицирования чугунов // Литейное производство. (В печати).

