

**МАТВЕЕВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОБРАТНОГО ОТБЕЛА В  
ОТЛИВКАХ ИЗ ЧУГУНА С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ ИХ КАЧЕСТВА**

**Специальность 05.16.04. "Литейное производство"**

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

**Москва – 2007**

Работа выполнена на кафедре технологии литейных процессов  
Государственного технологического университета  
«Московский институт стали и сплавов»

**Научный руководитель**

доктор технических наук,  
профессор

Пикунов  
Михаил Владимирович

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук,  
профессор  
кандидат технических наук

Дибров  
Иван Андреевич  
Клецкин  
Яков Григорьевич

**Ведущая организация:** ОАО «Завод «Водоприбор»

Защита состоится «15» ноября 2007 года на заседании диссертационного совета Д.212.132.02 при Государственном технологическом университете «Московский институт стали и сплавов» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д.6, ауд. А-305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного технологического университета «Московский институт стали и сплавов»

Автореферат разослан « 12 » октября 2007 года.

**Ученый секретарь**

диссертационного совета  
доктор технических наук,  
профессор

Семин А.Е.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Отливки из серого чугуна имеют широкое применение в машиностроении. При получении чугунных отливок возникает проблема получения однородной микроструктуры в различных сечениях. Отбел представляет собой образование в отливке участков содержащих цементит, что приводит к резкому ухудшению эксплуатационных свойств и создает сложности при механообработке. Образование подобного брака приводит к необходимости проведения графитизирующего отжига, что приводит к дополнительным энергозатратам и требует наличия термических печей. Обратный или внутренний отбел также является одним из видов брака чугунных отливок. Причины образования поверхностного отбела, такие как химический состав чугуна и скорость охлаждения отливки в форме, изучаются давно и хорошо известны. В то же время, на некоторых предприятиях в отливках периодически появляется обратный отбел, что выражается в получении отливки со структурой серого чугуна на поверхности и белого чугуна в центре. Данное явление изучалось недостаточно. Многие исследователи упоминают о нем, как об одном из видов аномальной структуры чугуна, однако экспериментальные и теоретические данные, приводимые этими исследователями, противоречивы и не позволяют точно ответить на вопрос, что является причиной обратного отбела. Связано это как с недостаточной изученностью строения жидкого чугуна и процессов, протекающих при его кристаллизации, так и с трудностями методического характера при проведении исследований, вследствие многообразия и сложности процессов, происходящих при охлаждении и кристаллизации расплава чугуна. В связи с этим изучение обратного отбела, выявление причин его образования и выработка рекомендаций по его предотвращению, является **актуальной научно-технической проблемой**.

**Цель работы** заключалась в выявлении основных причин возникновения обратного отбела и выработке рекомендаций по его предотвращению. Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

– выявлены закономерности образования обратного отбела в отливках из чугуна;

- определены причины формирования отбеленной структуры в центральной зоне отливки;
- изучено влияние ряда факторов на процесс формирования обратного отбела;
- предложены рекомендации для предотвращения обратного отбела.

#### **Научная новизна работы:**

1. Установлены причины образования обратного отбела, выражающиеся в действии геометрического фактора в цилиндрических частях отливок и в массивных частях отливок с прилегающими к ним тонкими частями;
2. Показано влияние карбидизирующих примесей (хрома, магния, церия, неодима и серы) и химического состава чугуна на склонность к образованию обратного отбела.
3. Установлено повышение склонности к обратному отбелу у чугунов с пониженным содержанием кремния и у чугунов, загрязненных элементами, снижающими активность углерода в расплаве (магнием, неодимом и церием).

#### **Практическая значимость работы:**

Выполненное комплексное исследование позволило выработать рекомендации по предотвращению образования обратного отбела, что позволяет снизить энергозатраты и себестоимость при производстве отливок из чугуна. Разработаны рекомендации на материалы и технологию изготовления литейной формы, химический состав расплава, технологию его выплавки и внепечной обработки, а также конфигурацию отливки, позволяющие предотвратить образование обратного отбела. Предлагается проводить графитизирующее модифицирование непосредственно перед заливкой, либо другую обработку, способствующую объемной кристаллизации расплава (ультразвуковую, вибрационную и т.п.), оптимизировать конфигурацию отливки и избегать накопления примесей в шихте.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на седьмом съезде литейщиков России, (г. Новосибирск, май 2005 г) и на научных семинарах кафедры технологии литейных процессов Московского института стали и сплавов (2005-2007г.г.)

**Публикации.** Содержание диссертации отражено в 3 работах в виде статей и тезисов докладов конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, выводов, списка литературы из 52 наименований. Общий объем работы составляет 132 страниц машинописного текста, включая 83 рисунков, 7 таблиц и приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложено состояние проблемы исследования обратного отбела на момент написания диссертации, показана актуальность выбранной темы, сформулирована цель работы.

В **первой главе** работы представлен аналитический обзор литературы посвященной исследованию обратного отбела. Проанализированы результаты немногочисленных работ, посвященных данной проблеме. Отмечено, что в данных работах приведены противоречивые сведения о причинах формирования обратного отбела и отсутствуют рекомендации по его предотвращению.

Несмотря на установленный факт влияния химического состава чугуна и различных примесей на образование обратного отбела, существует неопределенность влияния различных элементов. Это объясняется ограниченным количеством экспериментальных данных, а также сложностью их сопоставления вследствие различных условий проведения эксперимента. Показано, что практически не исследовано влияние конфигурации и геометрии отливки на образование обратного отбела.

Итогом литературного обзора явилось формулирование задач, требующих решения для достижения намеченной цели данной работы.

Во **второй главе** приведен расчет скорости кристаллизации расплава в затвердевающих отливках различной конфигурации, а также результаты компьютерного моделирования процесса затвердевания в программном пакете LVMFlow.

Рассчитывалась скорость затвердевания плоской плиты и цилиндра одной приведенной толщины заливаемых в одних и тех же условиях. Результаты расчета показали, что в случае плоской плиты происходит постепенное замедление скорости кристаллизации от поверхности плиты к центру, связанное как с уменьшением градиента температур металл-форма вследствие прогрева формы, так и вследствие уменьшения интенсивности теплоотвода последней из-за ее нагрева. В случае цилиндрической отливки происходит увеличение скорости кристаллизации от поверхности к центру вследствие действия геометрического фактора, связанного с

уменьшением радиуса фронта кристаллизации, приводящем к уменьшению его площади и увеличению удельного теплоотвода.

Уравнение, описывающее скорость затвердевания плоской плиты можно вывести, продифференцировав уравнение закона квадратного корня  $x=k\cdot\sqrt{\tau}$ . В результате получим уравнение, описывающее скорость роста твердой корки в плоской отливке на различном расстоянии от поверхности формы:

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{k^2}{2 \cdot x}, \text{ где}$$

$x$  – расстояние от края формы,

$$k = \frac{2 \cdot b_{\phi} \cdot (t_{кр} - t_0)}{L_m \cdot \rho_m \cdot \sqrt{\pi}}, \text{ где}$$

$b_{\phi}$  – теплоаккумулирующая способность формы,

$t_{кр}$  – температура кристаллизации расплава,

$t_0$  – температура формы перед заливкой,

$L_m$  – удельная теплот кристаллизации расплава,

$\rho_m$  – плотность расплава.

Скорость затвердевания цилиндрической отливки описывается более сложным уравнением:

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{k^2 \cdot R^2}{x \cdot (2 \cdot R - x) \cdot (R - x)}$$

$x$  – расстояние от края формы,

$R$  – радиус цилиндрической отливки

Графики скоростей кристаллизации в процессе затвердевания цилиндрической и плоской отливки приведены на рисунке 1.

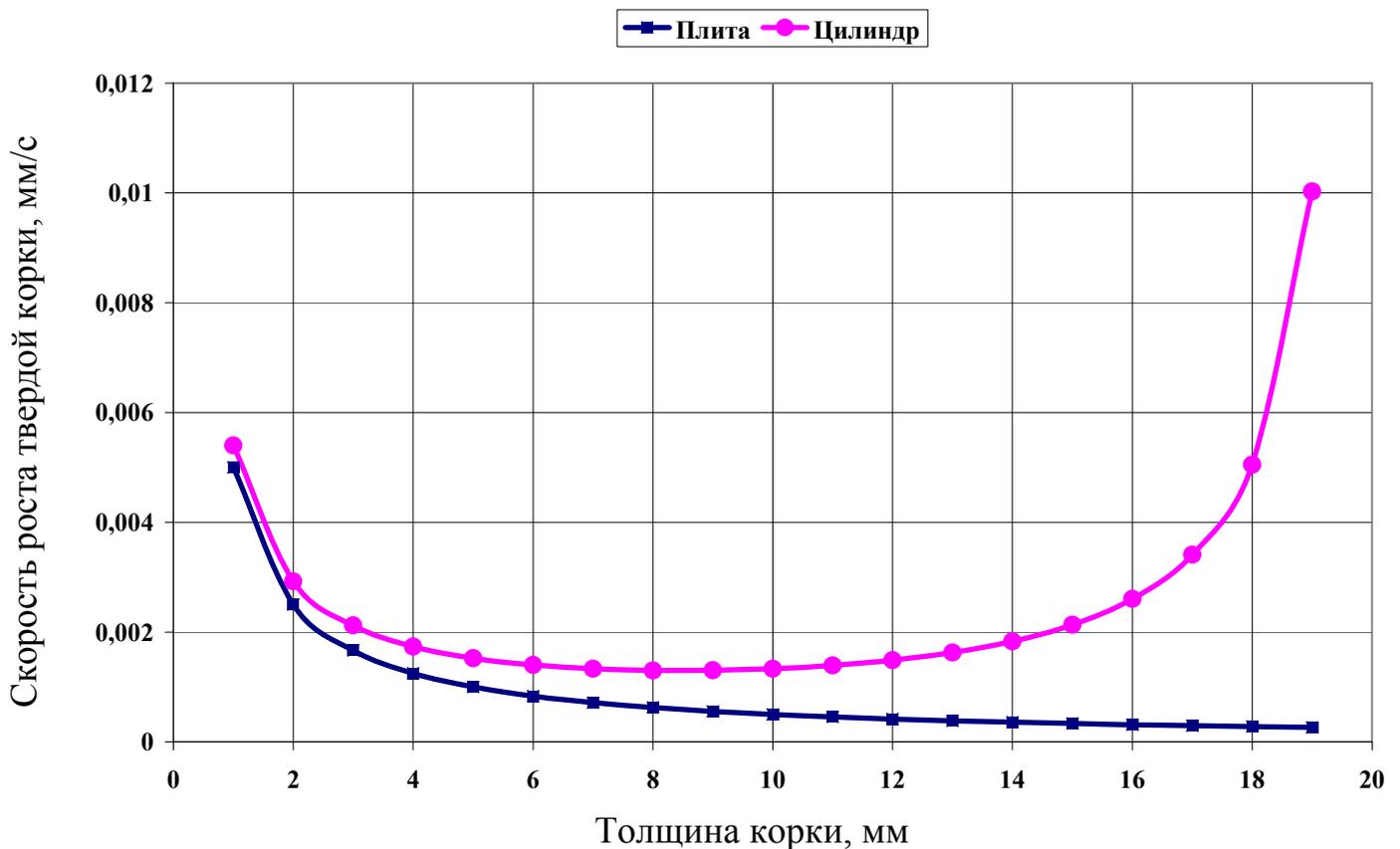


Рисунок 1 – Скорость затвердевания цилиндрической (диаметром 30 мм) и плоской (толщиной 30 мм) отливок в поперечном направлении

Увеличение скорости затвердевания происходит вследствие возрастания удельного теплоотвода. Это в свою очередь вызывает увеличение переохлаждения расплава и соответствующее увеличение скорости кристаллизации, которая начинает происходить по метастабильной диаграмме. Таким образом, в определенном интервале скоростей охлаждения цилиндрической отливки возможно возникновение обратного отбела.

Расчет скорости затвердевания плиты переменного сечения показал, что тонкая часть затвердевает раньше массивной и начинает действовать как металлический холодильник, от узкой части которого движется фронт кристаллизации, при этом он забирает достаточно большое количество тепла, вследствие чего скорость затвердевания в продольном направлении превышает скорость затвердевания в поперечном в несколько раз.

В случае отсутствия перегрева при заливке металла можно получить следующую зависимость:

$$Q = k \cdot \sqrt{\tau} \cdot F_m \cdot \rho_m \cdot L_m$$

Сделав допущение об отсутствии градиента температур в тонком сечении можно получить, что удельный теплоотвод на стыке толстого и тонкого сечения можно описать формулой:

$$q = k \cdot \sqrt{\tau} \cdot \rho_m \cdot L_m \cdot \frac{F_m}{F_c}$$

Если перейти от удельного теплоотвода к скорости нарастания твердой корки, то можно получить следующее уравнение:

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{k \cdot F_m}{2 \cdot \sqrt{\tau} \cdot F_c}$$

Так для отливки, приведенной на рисунке 2, продольная скорость больше поперечной в 20 раз.

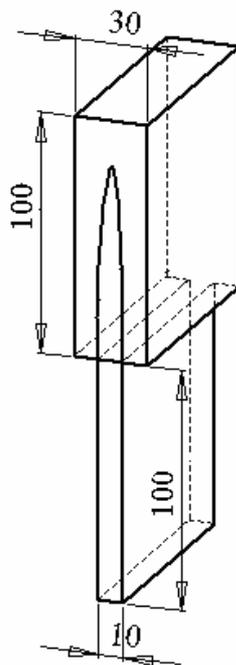


Рисунок 2 – Элемент отливки переменного сечения

На реальных отливках из-за наличия градиента температуры соотношение скоростей будет ниже, но можно считать, что для небольших элементов до 20 мм толщиной и 50 длиной подобное допущение можно применять.

Причины образования обратного отбела в данном случае такие же, как и в предыдущем: интенсивный удельный теплоотвод приводит к увеличению переохлаждения и кристаллизации по метастабильной диаграмме.

Для наглядности было проведено компьютерное моделирование процесса затвердевания отливок различной конфигурации в программном пакете LVMFlow, в основе модели кристаллизации сплавов которого лежит квазиравновесная теория.

Данные компьютерного моделирования, с пошаговым теплотехническим расчетом, сходны с данными полученными расчетом по закону квадратного корня. Компьютерное моделирование также показало увеличение скорости затвердевания в цилиндрических отливках и на переходе от тонкого сечения к толстому.

В главе 3 описаны объект и методика исследования; описан процесс получения и подготовки образцов.

В качестве материалов для проведения эксперимента были выбраны:

- низкокремнистый железуглеродистый сплав, выплавленный из нелегированной стали и дробленного графита;
- промышленный чугун;
- двойной железуглеродистый сплав, выплавленный карбонильного железа и дробленного чистого высокоплотного графита.

Химический состав данных сплавов представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав использованных сплавов

Содержание, %	C	Si	Mn	S	P	Cr	прочие	Fe
Низкокремнистый железуглеродистый сплав	4,2	0,24	0,52	0,022	0,023	0,05	Менее 0,1	ост.
Промышленный чугун	3,78	1,49	0,56	0,032	0,038	0,02	Менее 0,1	
Двойной железуглеродистый сплав	4,3	Обнаружены в следовых количествах						

Выплавка низкокремнистых железуглеродистых сплавов и промышленного чугуна проводилась в индукционной тигельной печи ИСТ-0,06 и высокочастотной индукционной плавильной установке УИП-5-60-5,0, измерение температуры проводилось термопарой ВР-5/20, подключенной к автоматическому потенциометру КСП-1.

Из низкокремнистого железуглеродистого сплава были отлиты цилиндрические пробы переменного сечения, представляющие собой 3 соосных цилиндра диаметром 10, 20 и 30 мм (так называемая проба «ступенька»), залитые в форму из влажной песчано-глинистой смеси, и клиновые пробы, залитые в форму из стержневой смеси на органическом связующем. Пробы заливались с различными температурами заливки.

Из промышленного чугуна были отлиты цилиндрические и плоские пробы переменного сечения. Из двойного железуглеродистого сплава были отлиты цилиндрические пробы диаметром 10 мм для исследования влияния примесей.

Были залиты цилиндрические пробы диаметром 40 мм и высотой 150 мм с установленными в форме термопарами ВР-5/20, подключенными к устройству ТРМ-151 для измерения и записи температурных кривых по сечению в процессе затвердевания отливки.

Цилиндрические пробы переменного сечения были разрезаны поперек на 3 части для исследования сечений 10, 20 и 30 мм. Одна из таких проб была разрезана вдоль для изучения взаимного влияния сечений. Плоские пробы переменного сечения и клиновые пробы были разрезаны вдоль. Также был получен излом плоской пробы переменного сечения.

Из полученных образцов были приготовлены микрошлифы для изучения микроструктуры по их сечению. Образцы изучались в нетравленном и травленном состоянии. Травление производилось 4% раствором азотной кислоты в спирте.

Наличие и количественное распределение фаз производилось на микроскопе НЕОРНОТ-21 визуально, тип фаз проверялся измерением микротвердости на микротвердомере ПМТ-3 вдавливанием алмазной четырехгранной пирамидки по ГОСТ 9450-76.

Также было проведено измерение твердости по ГОСТ 9012-89 по сечению цилиндрических образцов.

Химический состав образцов измерялся методом количественного атомно-эмиссионного спектрального анализа по ГОСТ 27611-88.

Сочетание металлографического анализа с измерением твердости и термическим и химическим анализом позволило получить большой объем экспериментальных данных, позволяющих изучить влияние конфигурации отливки и химического состава сплава на склонность к образованию обратного отбела.

В **главе 4** приведены и проанализированы данные, полученные при оценке микроструктуры, химического состава и твердости цилиндрических образцов, а также при их термическом анализе.

Количественный анализ микроструктуры проводился по сечению травленного образца при 100-кратном увеличении методом секущих. Образцы диаметром 10 мм получились полностью отбеленные по всему сечению. Образцы диаметром 20 мм представляли собой половинчатый чугун с большим количеством ледебурита в центре и минимальным на удалении 5 мм от края. Образцы диаметром 30 мм также были частично отбеленными, причем в центральной части присутствовал только ледебурит, а на расстоянии 5 мм от края он практически отсутствовал. Полученные данные для образцов диаметром 30 мм приведены на рисунке 3. Характерная микроструктура по сечению этих образцов приведена на рисунке 4.

Твердость по сечению образца изменяется закономерно, то есть максимальная твердость в центральной части падает до минимума на расстоянии 5 мм от края и снова возрастает. Данные по изменению твердости по сечению 30 мм образца приведено на рисунке 5.

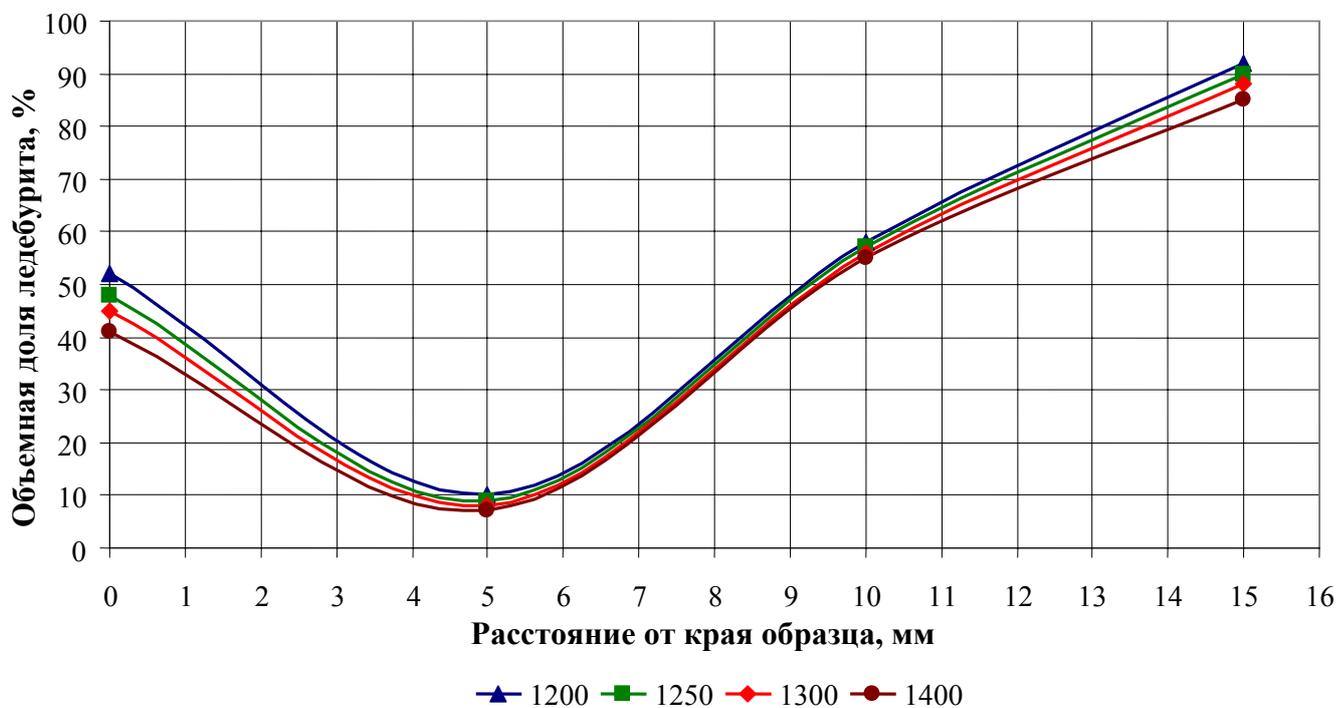
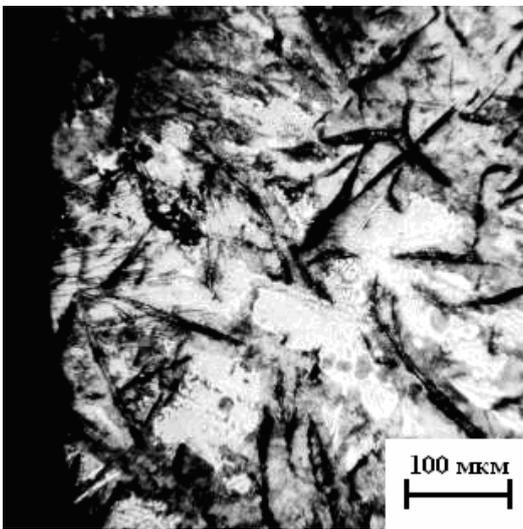


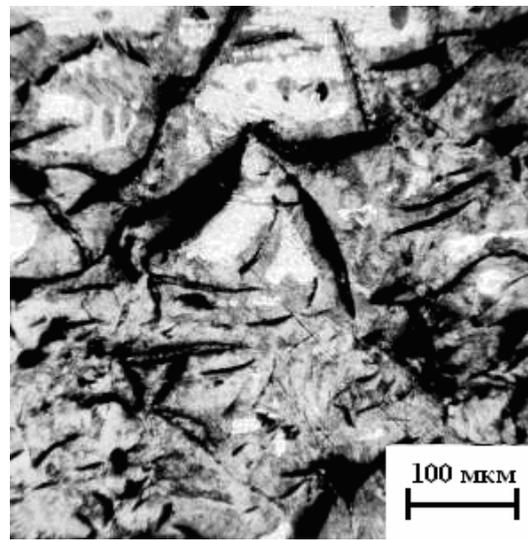
Рисунок 3 – Распределение ледебурита по сечению образцов диаметром 30 мм, залитых при разных температурах (температуры указаны в градусах Цельсия)

Проведенный атомно-эмиссионный спектральный химический анализ различий химического состава по сечению образца не выявил.

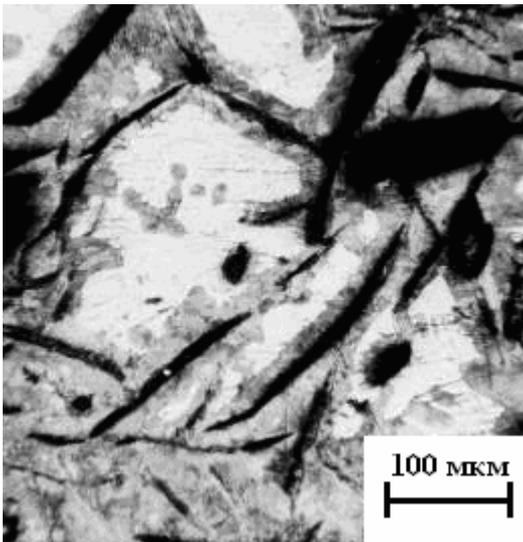
Термический анализ образцов диаметром 40 мм показал изменение скорости охлаждения по сечению. Скорость охлаждения выше в центральной части образца, и кристаллизация протекает там соответственно с большим переохлаждением, что видно из рисунка 6.



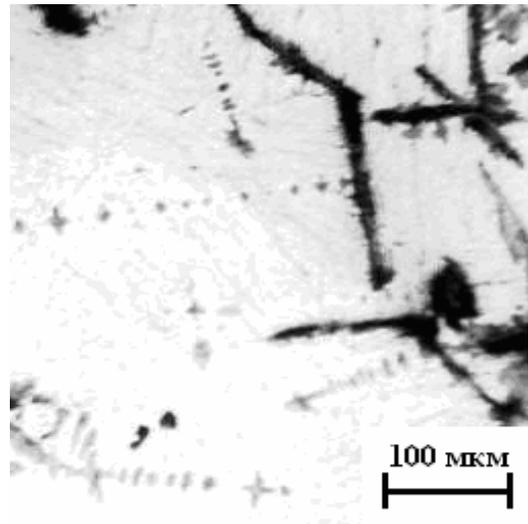
*a*



*б*



*в*



*г*

Рисунок 4 – Характерная микроструктура по сечению 30 мм образца на разном расстоянии от края *a*) 0 мм; *б*) 5 мм; *в*) 10 мм; *г*) 15 мм (травлено)

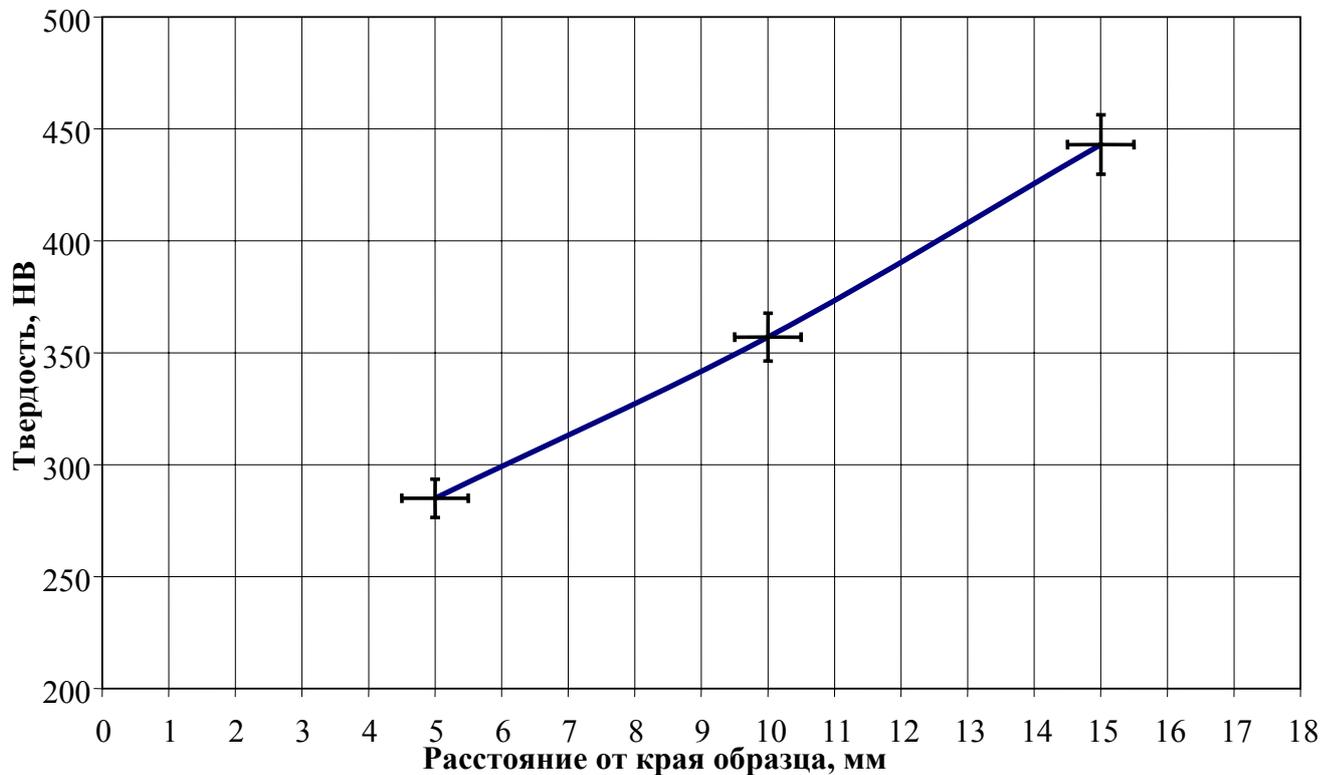


Рисунок 5 – Изменение твердости по сечению образца диаметром 30 мм

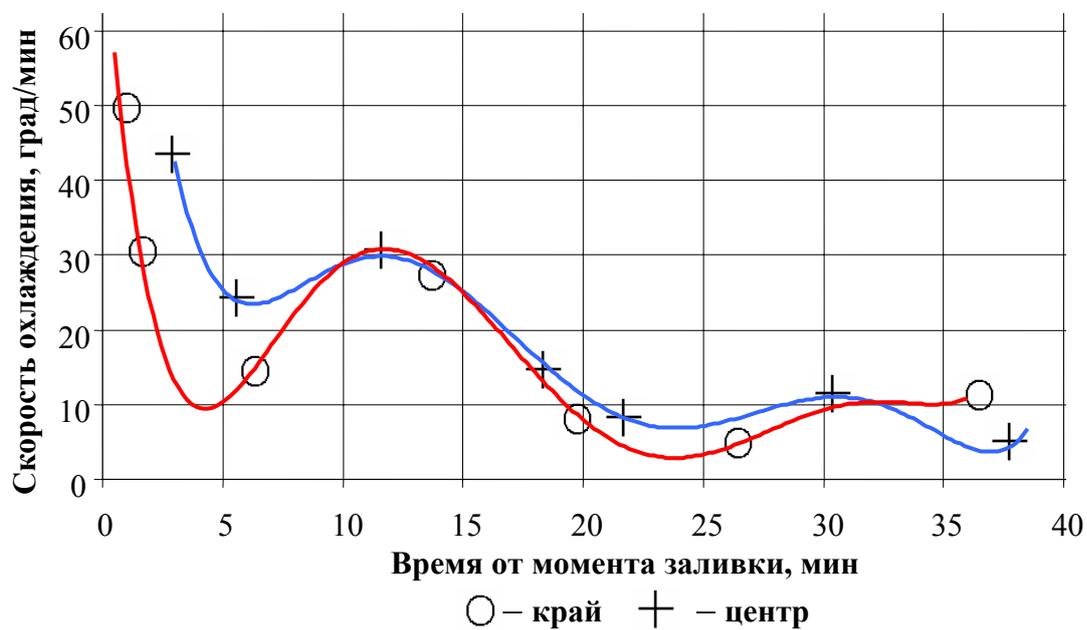


Рисунок 6 – Скорость охлаждения в зависимости от расстояния от края цилиндрического образца диаметром 40 мм

Полученные результаты подтвердили изменение скорости кристаллизации по сечению цилиндрических отливок. Из полученных данных видно, что доля ледебурита увеличивается в центральной части отливки, что связано с увеличением скорости кристаллизации и переохлаждения расплава вследствие увеличения удельного теплоотвода. Наличие минимума на графике можно объяснить тем, что сначала скорость кристаллизации падает вследствие того, что уменьшение градиента температур металл-форма и теплопроводности формы превалирует над уменьшением площади фронта кристаллизации. Вторым минимумом на графике объясняется эвтектоидным превращением, при котором также происходит остановка температуры. На расстоянии 5 мм от края образца влияние этих факторов взаимно компенсируется, а затем влияние уменьшения площади фронта кристаллизации начинает превалировать над влиянием уменьшения градиента температур и теплопроводности.

В **главе 5** приведены и проанализированы данные, полученные при анализе микроструктуры и химического состава плоских образцов переменного сечения.

Было выявлено, что на образцах с переменным сечением возможно возникновение обратного отбела. На данном образце хорошо видно, наличие отбеленной структуры в центральной части толстой плиты, и отсутствие ее в тонкой части образца, что отражено на рисунке 7. Кроме того, металлографическим исследованием было установлено, что с края толстой плиты в структуре присутствует феррит, а графит имеет размер, превышающий размер графита в тонкой части в несколько раз. Это подтверждает, что толстая плита затвердевала медленнее тонкой, а после затвердевания последней оставшаяся жидкость кристаллизовалась по метастабильной диаграмме состояния с образованием ледебурита.

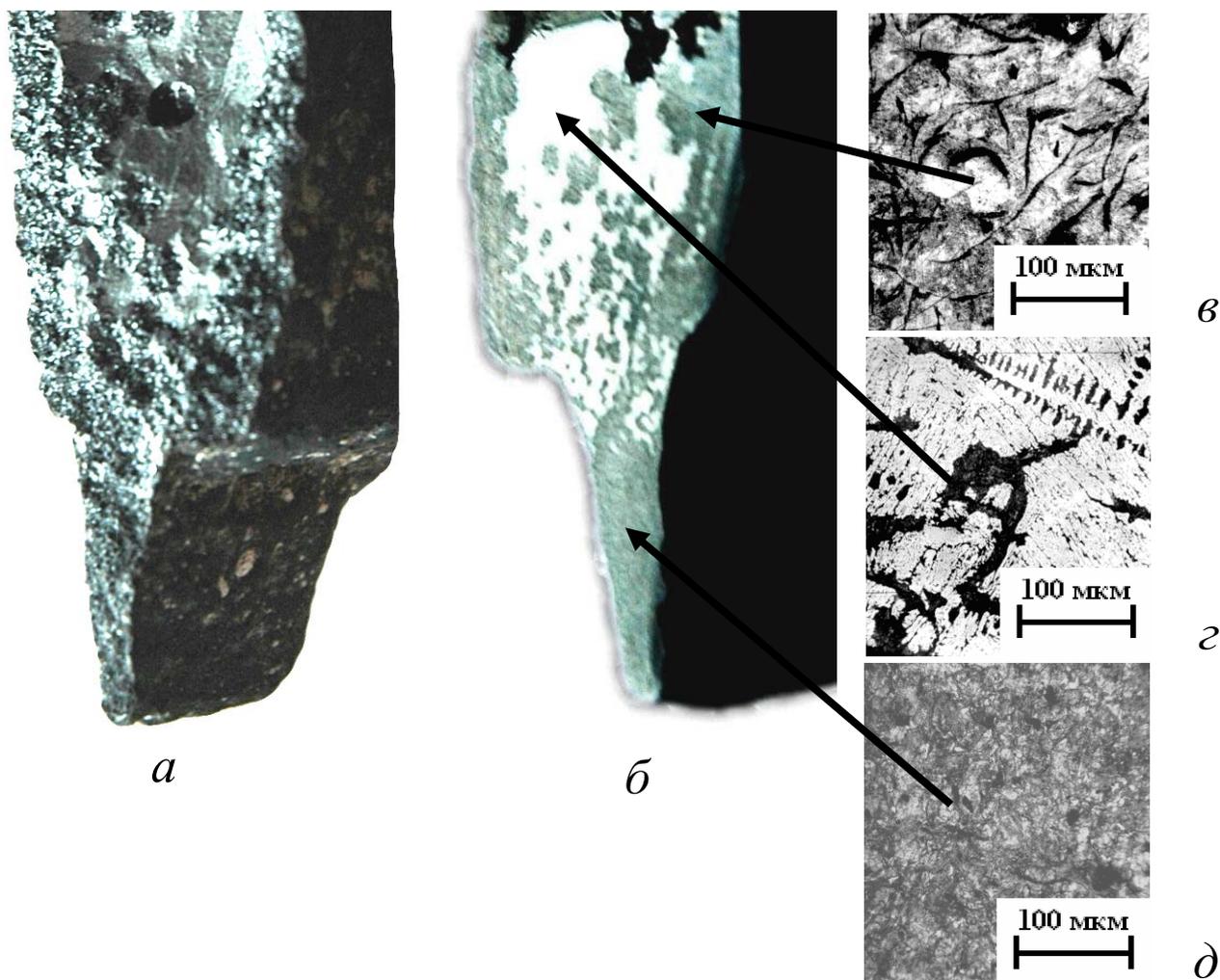


Рисунок 7 – Переход от тонкого сечения к толстому  
*a* – излом; *б* – шлиф; *в*, *г* и *д* –микроструктура (травлено)

Атомно-эмиссионный спектральный анализ не выявил различий химического состава по сечению образца.

В главе 6 представлены результаты изучения влияния химического состава на склонность к образованию обратного отбела. В образцах изготовленных из промышленных чугунов, в которых содержится достаточное количество кремния, обратный отбел образуется, как правило, совместно с поверхностным отбелом, что можно связать с тем, что кремний увеличивает интервал кристаллизации сплавов на основе железа и как следствие ширину двухфазной области. Поэтому для проявления обратного отбела требуется изначально более высокая скорость охлаждения, которая приводит и к появлению поверхностного отбела. При снижении содержания кремния отливка начинает кристаллизоваться послойно с

узкой двухфазной областью и таким образом возможно появление только обратного отбела.

Различные примеси также оказывают влияние на обратный отбел. Было установлено, что примеси, снижающие активность углерода в расплаве, такие как, магний, церий, неодим, увеличивают склонность к появлению обратного отбела. В тоже время как хром, образующий стойкие карбиды оказывает влияние только на поверхностный отбел. Пример влияния таких примесей отражен на рисунке 8.

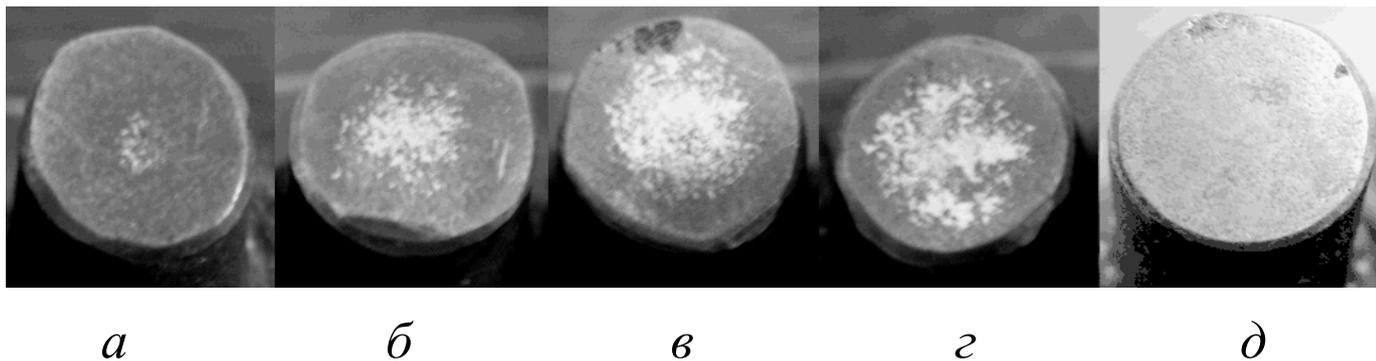


Рисунок 8 – Макроструктура образцов диаметром 10 мм с различным содержанием неодима

*а* – 0,1%; *б* – 0,2%; *в* – 0,3%; *г* – 0,4% и *д* – 0,5% Nd (х3, травлено)

Видно что, увеличение содержания неодима приводит к появлению и образованию обратного отбела на образцах, что связано с уменьшением активности углерода в расплаве и увеличением склонности данного сплава к отбелу. Скорость кристаллизации сплава, при которой формируется отбеленная структура, понижается, и при той же скорости кристаллизации формируется отбеленная структура. Схематично это отражено на рисунке 9, линиями показаны критические скорости кристаллизации, при которых сплав кристаллизуется по метастабильной диаграмме, зависящие от его химического состава. Отображены варианты с высокой критической скоростью (сплав не склонен к отбелу), со средней критической скоростью (сплав имеет большую, чем в первом случае склонность к отбелу), и с низкой критической скоростью (сплав сильно склонен к отбелу).

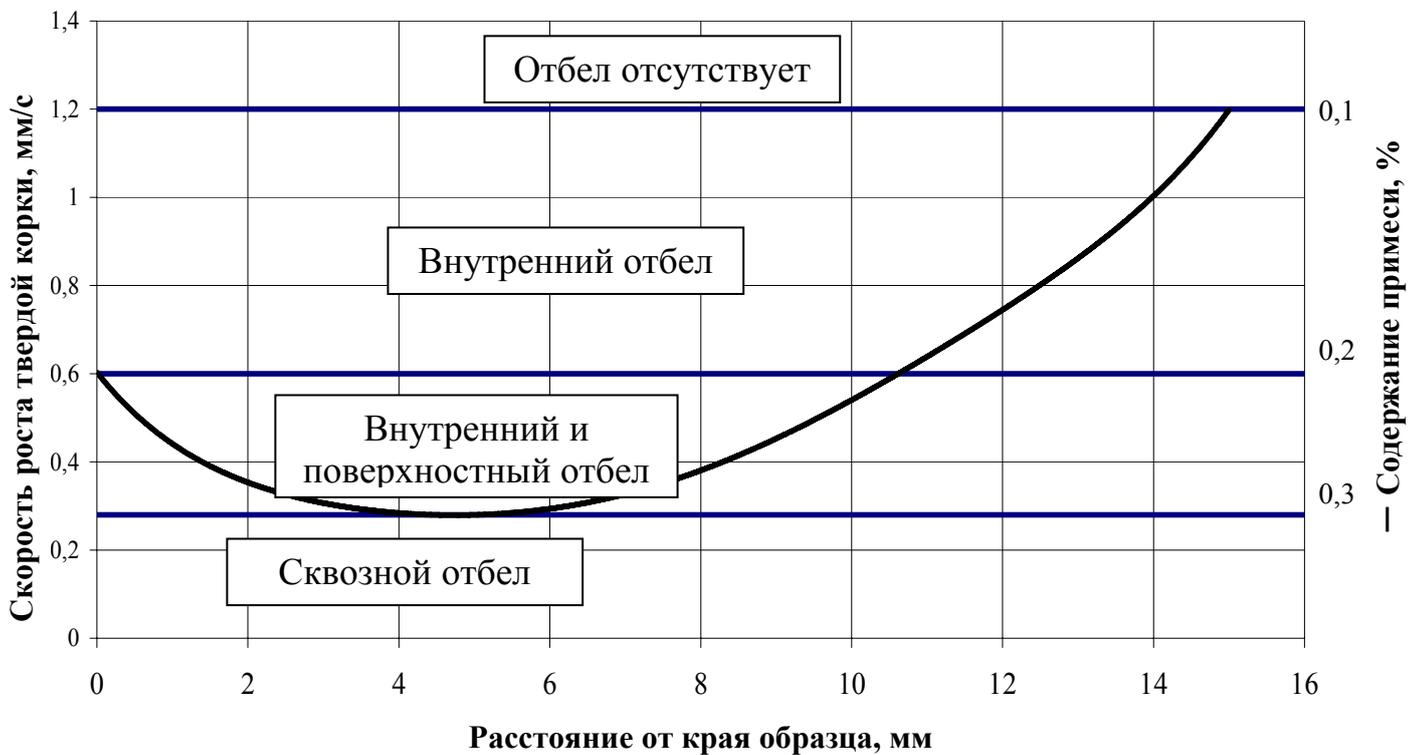


Рисунок 9 – Влияние содержания примесей, уменьшающих активность углерода в расплаве, на формирование обратного отбела

В главе 7 приведены практические рекомендации по предотвращению образования обратного отбела.

В первую очередь на склонность к формированию обратного отбела оказывает влияние геометрический фактор, т.е. конфигурация отливки, поэтому следует избегать значительного различия толщин стенок отливки, минимизировать количество поверхностей с положительной кривизной, и если это невозможно стараться снизить теплоотвод на этих поверхностях путем применения теплоизолирующих красок либо теплоизолирующих смесей.

Кроме того, возможно введение добавок способствующих увеличению двухфазной области при затвердевании отливки и снижающих склонность к отбелу (повышение содержания кремния), либо приводящих к объемной кристаллизации металла в отливке (ввод небольшого количества мелко дробленого ферросилиция в разливочный ковш, либо вдувание графитовой спели в расплав).

Так же следует избегать накопления в возврате неконтролируемых примесей снижающих активность углерода в расплаве, как правило, это РЗМ попадающие в шихту с ломом высокопрочного чугуна и легированных сталей.

## **ВЫВОДЫ**

1. Установлено, что возникновение внутреннего отбела в цилиндрических и сферических отливках (обладающих выпуклой поверхностью) происходит при кристаллизации расплава по метастабильной диаграмме состояния с выделением цементита вместо графита. Что вызывается уменьшением коэффициента диффузии углерода из-за высокой скорости охлаждения в центре отливке, вследствие действия геометрического фактора.

2. Выявлено, что обратный отбел может образовываться в месте смыкания тонкой части отливки с толстой, например, в месте подвода питателей и выпоров, вследствие их более быстрого затвердевания по сравнению с телом отливки.

3. Установлено, что в цилиндрических отливках изготовленных, из чугуна с повышенным содержанием кремния, обратный отбел образуется только вместе с поверхностным отбелом.

4. Показано, что ввод элементов, снижающих активность углерода и не образующих карбидов, может привести к образованию обратного отбела, при достаточно высокой скорости кристаллизации.

5. Проведенное комплексное исследование позволило выработать рекомендации по предотвращению образования обратного отбела, что позволяет снизить энергозатраты и себестоимость при производстве отливок из чугуна. Предлагается проводить графитизирующее модифицирование, либо другую обработку, способствующую объемной кристаллизации расплава (ультразвуковую, вибрационную и т.п.), оптимизировать конфигурацию отливки и избегать накопления примесей в шихте.

### **Основные результаты работы представлены в публикациях:**

1. Пикунов М.В., Воронцов В.И., Матвеев С.В. Особенности затвердевания отливок из серого чугуна как возможная причина внутреннего отбела в структуре металла. //Известия ВУЗов. Черная металлургия.МИСИС, Москва, 2005 № 3 с.55-57
2. Матвеев С.В. Особенности затвердевания отливок из серого чугуна как возможная причина внутреннего отбела. //Труды седьмого съезда литейщиков России. Том 1. ИД “Историческое наследие Сибири”, Новосибирск. РАЛ, г.Москва 23-27 мая 2005
3. Матвеев С.В. Влияние сфероидизирующих модификаторов на формирование обратного отбела. //Литейщик России РАЛ, Москва, 2005 №12 с. 14-15





