

Т 484

Контрольный  
экземпляр  
На правах рукописи



Ткачев Владимир Михайлович

РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ  
ЛИТЬЯ ПЛИТ ИЗ ВЫСОКОМАРГАНЦОВИСТОЙ СТАЛИ

Специальность 05.16.04 – «Литейное производство»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2011

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

Научный руководитель — кандидат технических наук, доцент  
Ердаков Иван Николаевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Вдовин Константин Николаевич  
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский  
государственный технический университет  
им. Г.И. Носова»;  
кандидат технических наук, доцент  
Сулицин Андрей Владимирович  
ФГАУ ВПО «Уральский федеральный  
университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина».

Ведущее предприятие — ООО «Спецремзавод» (г. Челябинск).

Защита диссертации состоится 1 декабря 2011 г., в 15<sup>00</sup> часов, в ауд. 201 (гл. корп.) на заседании диссертационного совета Д 212.298.06 при Южно-Уральском государственном университете.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, ученый совет. Тел. (351) 267-91-23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЮУрГУ.

Автореферат разослан \_\_\_ октября 2011 года.

Учёный секретарь совета  
доктор технических наук,  
профессор



И.А. Щуров

0527903

**Актуальность проблемы.** Ввиду стратегической важности отраслей заготовительно-перерабатывающего комплекса (ЗПК) в обеспечении экономической безопасности страны, создание предпосылок их устойчивого качественного развития является важной народнохозяйственной задачей. Определяющим фактором эффективности функционирования ЗПК становится ресурсосбережение.

Поэтому при создании новых литейных технологий требуется обязательно учитывать рациональное и оптимальное использование материалов и энергии. Это касается технология изготовления литых плит из высокомарганцовистой стали 110Г13Л (Гадфильда), которые используют в дробильных установках ферросплавного производства, работают в условиях ударно-абразивного износа и имеют короткий срок эксплуатации.

Анализ специальной литературы и результаты предварительных экспериментов в цехе ремонтного литья ЧЭМК показали, что существующие подходы к способу изготовления литых плит из стали 110Г13Л в разовые песчано-глинистые формы требуют использования массивных прибылей, трудоемких манипуляций с литейной формой перед или после заливки для обеспечения заданного угла ее наклона, что увеличивает себестоимость технологии и приводит к низким показателем ТВГ (45...55%).

Поэтому создание прогрессивных технологий литья плит из высокомарганцовистой стали с конструированием оптимальных литниково-питающих систем, обеспечивающих повышение качества литых изделий при существенной экономии материала на литники и прибыли, снижении трудоемкость процесса является актуальной задачей литейного производства.

**Цель и задачи исследования.** Настоящая диссертационная работа имела целью повысить качество литых плит из высокомарганцовистой стали за счет создания новой конструкции литниково-питающей системы, а также разработать ресурсосберегающую технологию их литья в разовые песчано-глинистые формы. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- провести анализ известных способов литья плит из стали Гадфильда, выявить их недостатки и предложить новый вариант ресурсосберегающего процесса формирования плиты повышенного качества в разовых песчано-глинистых формах;

- определить методы исследования, разработать модель и создать методику определения дефектности литых плит в условиях действующего литейного производства;

- разработать конструкции литниково-питающих систем (ЛПС) для плит из стали 110Г13Л, обеспечивающих показатель технологического выхода годного (ТВГ) более 70%;

- изучить влияние способа заливки стали Гадфильда через разработанные ЛПС на качественные показатели плиты;

- изучить характер затвердевания плиты, изготовленной по разработанной технологии;

Южно-Уральский  
гос. университет  
НАУЧНАЯ  
БИБЛИОТЕКА

– методом планирования эксперимента создать математическую модель и оптимизировать технологические параметры;

– освоить в производстве разработанную ресурсосберегающую технологию.

**Научная новизна.** Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена совокупность научных положений, обеспечивающих новые технологические решения в изготовлении литых плит из высокомарганцевистой стали при литье в разовые песчано-глинистые формы. В том числе:

– модель на основании, которой разработана методика оценки дефектности плиты в производственных условиях;

– впервые определено влияние новой конструкции ЛПС на качество изготовления плит из стали 110Г13Л;

– установлен характер затвердевания литой плиты из стали 110Г13Л, полученной с использованием разработанной ЛПС;

– теоретически и экспериментально доказана возможность применения разработанной ЛПС в технологии литья высококачественных плит из высокомарганцевистой стали с повышенным ТВГ до 75...85%;

– впервые построена регрессионная модель разработанной технологии.

**Практическая ценность работы.** На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана ресурсосберегающая технология изготовления плит из высокомарганцевистой стали при литье в разовые песчано-глинистые формы устойчивая к колебаниям химического состава стали и температуры заливки, и, исключая дополнительные манипуляции с залитой формой

Использование специальной конструкции ГЛС в сочетании с рациональным местом установки прямой прибыли обеспечивает получение плит из стали Гадфилда с высоким уровнем физико-механических свойств и увеличенным в 1,5...1,7 раза ТВГ.

Компьютерная программа расчета параметров ресурсосберегающей технологии позволяет автоматизировать рабочее место технолога.

Внедрение данной технологии в производственный цикл литейных цехов позволит сократить себестоимость изготовления стальных отливок и увеличить срок их эксплуатации.

**Реализация работы.** Разработанная ресурсосберегающая технология изготовления плит из стали 110Г13Л прошла опытно-промышленное испытание в цехе ремонтного литья ОАО «Челябинский электрометаллургический комбинат» (ЧЭМК) на плитах разного типа-размера и массы, и успешно внедрена в производство с суммарным экономическим эффектом (в ценах 2008 г.) 4,3 млн. руб.

**Апробация работы.** Основные материалы диссертации были представлены на 8-й Всероссийской научно-практической конференции в Санкт-Петербурге (2010 г.), на XXX Российской школе по проблемам науки и технологиям, посвященной 65-летию Великой Победы, при УрО РАН г.Екатеринбург (2010 г.), на 12-й международной научно-технической конференции в Запорожье «Неметаллические включения и газы в литейных сплавах» (2009 г.) и XIV Международной конференции в Челябинске «Современные проблемы электрометаллургии стали» (2010 г.).

### **На защиту выносятся следующие положения:**

- модель и методика оценки дефектности плит в производственных условиях;
- конструкция ЛПС, обеспечивающая повышение качество изготавливаемых плит и экономию металла на литники и прибыли;
- экспериментальные результаты влияния параметров разработанной ЛПС на дефектность плит и срок эксплуатации;
- характер затвердевания отливки, залитой через разработанную ЛПС;
- математическая модель разработанной технологии.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 9 научных статей, из них 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, библиографического списка из 118 наименований и приложений; содержит 136 страниц машинописного текста, 37 таблиц, 69 рисунков.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

*Во введении* дано обоснование темы диссертации, её актуальности, представлена структура, краткое содержание глав, положения, выносимые на защиту.

*В первой главе* рассмотрено современное состояние производства отливок из стали 110Г13Л методом литья в разовые песчано-глинистые формы, выявлены особенности и специфика изготовления отливок из стали Гадфильда. Осуществлен анализ и выявлены недостатки существующих технологий литья плит из данной стали. Показано, что все они обладают рядом существенных технологических недостатков. При изготовлении литых дробящих плит литейная форма должна находиться под определенным углом. Для обеспечения направленного затвердевания требуется выполнения значительных напусков по высоте отливки или переворачивание формы почти на 120°...180°. При этом обязательно должны быть использованы массивные прибыли. Все это несомненно удлинит технологический цикл изготовления плит, повышает трудоемкость их производства, требует дополнительного оборудования на участке заливки, значительного расхода жидкого металла на литники и прибыли. Сделан вывод, что совершенствование технологий литья плоских плит в песчано-глинистые формы в настоящее время возможно за счет разработки оптимальных ЛПС, обеспечивающих значительное снижение трудоемкости процесса, экономию расплава и повышение ТВГ.

На основании этого обоснована актуальность работы, поставлены цель и задачи исследований.

*Во второй главе* определены методы исследования и разработана методика промышленной оценки дефектности плит в производственных условиях. Учитывая размеры плит и важность адаптации технологического процесса к литейному цеху ЧЭМК, были выбраны следующие методы измерений:

1. Метод планирования промышленных экспериментов (ДФЭ<sup>2</sup>);
2. Метод компьютерного моделирования (САЕ-система LVMFlow);
3. Метод металлографического анализа (ПАК Thixomet);
4. Метод электронной микроскопии (РЭМ JOEL JSM-64600LV);
5. Метод ультразвуковой дефектоскопии (дефектоскоп «Пеленг» УДЗ-103).

Для оценки дефектности плит, полученных в условиях литейного цеха электрометаллургического комбината, необходимо было разработать специальную методику. При этом исходили из следующих постулатов, требований и условий:

- методика не должна разрушать отливку, обеспечивать стабильность измерения и точность ( $\pm 10\%$ ) по явным наружным дефектам;
- технически значимые скрытые дефекты отливок плит проявляют себя снаружи в виде поверхностных аномалий (утяжин, коробления, трещин);
- дефектность (суммарный показатель дефектности) должна оцениваться однозначным количественным показателем (одним числом);
- единица измерения дефектности должна иметь адекватный физический смысл, а именно, выражаться отношением объема дефектов к площади поверхности отливки, на которой они выявлены;
- составляющие интегрального показателя дефектности должны определяться на отливке с помощью стандартного мерительного инструмента;
- для расчета показателя дефектности в учет брать только технически значимые объемные дефекты (снижающие срок службы или повышающие трудоемкость обработки отливок);
- сумма безразмерных нормированных значений дефектов считать суммарным показателем дефектности отливки.

Согласно методики для значимых дефектов составляли каталог и карты дефектов с определением среднего объема дефекта с определением объема дефектов приходящихся на единицу поверхности плиты, количество дефектов приходящихся на единицу поверхности; степени коробления, отсутствия или наличия трещины с суммарной протяженностью. Значимыми признавались явные дефекты размером в свету более 20 мм, высотой и глубиной более 2 мм. Из всего списка возникающих дефектов в исследованиях измеряли утяжины, коробление и трещины. Поскольку именно эти дефекты плиты связаны с ее сроком эксплуатации.

Количественным параметром утяжины считали ее объем, который определяли по формуле объема конических тел:  $V=1/3 \cdot (S_{\text{основания}} \cdot h_{\text{конуса}})$ . Такой подход снижает ошибку измерения. Площадь основания рассчитывали как произведение продольного и поперечного габарита дефекта на поверхности отливки, что позволяет в технических требованиях на отливку оперативно и точнее регламентировать допуск дефекта и оставлять его без исправления. Коробление оценивали величиной наибольшего отклонения тыльной посадочной поверхности плиты от плоскости в мм. Протяженность трещины определяли курвиметром в мм.

В качестве бланка для начертания карты дефектов служил эскиз поверхности плиты, содержащий изображение элементов литейной формы. Карту дефектов получали путем нанесения контуров технически значимых дефектов в масштабе и по месту их расположения с указанием номера. Параллельно составлялся каталог этих дефектов в виде списка и реквизитов отливки: номер чертежа, дата изготовления, температура и время заливки. С рукописных карт и каталогов делали электронные копии по специальным графическим правилам. Итоговая таблица содержит полную информацию о количестве и размерах дефектов по видам и соответствующим количественным характеристикам.

Разработанная методика позволила полностью формализовать процедуру

контроля свойств литых плит в производственных условиях предприятия.

В третьей главе разработаны варианты конструкции ГЛС и места установки прямой прибыли с уменьшенным в 3 раза объемом и изучено их влияние на качество изготовления плит.

Исследования проводили на широко используемых в дробильных установках плоских оребренных плитах с характеристиками: 1164x950x100 мм и массой 450 кг; 1500x915x150 мм и массой 850 кг; 1080x1045x250 мм и массы 1200 кг. По массе плиты разделили на «легкую», «средней массы» и «массивную». Предложенные конструкции ЛС(I-ЛС, V-ЛС, Г-ЛС, С-ЛС), варианты установки прибыли и результаты компьютерного моделирования показаны на рис. 1 – 5, соответственно.

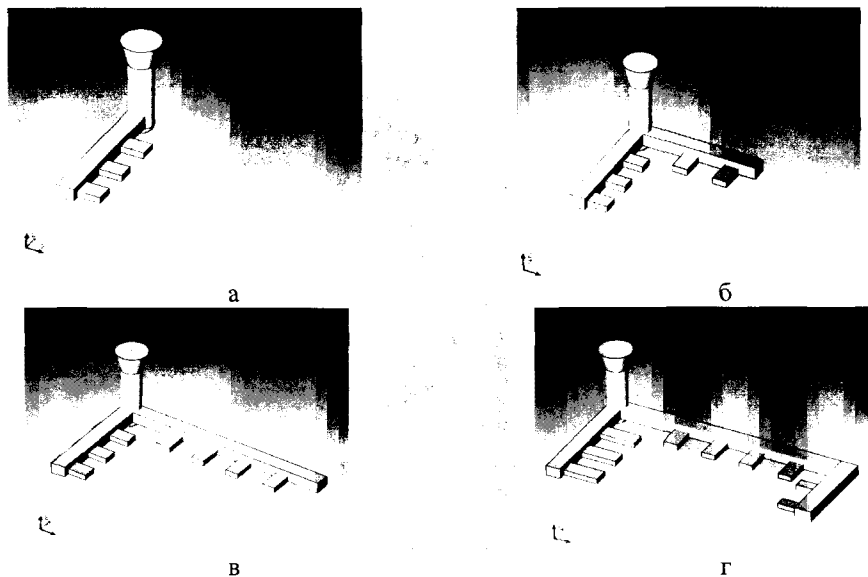


Рис. 1. Предложенные конструкции горизонтальной ЛС:  
а – классическая (I-ЛС); б – угловая (V-ЛС); в – Г-образная (Г-ЛС);  
г – С-образная (С-ЛС)

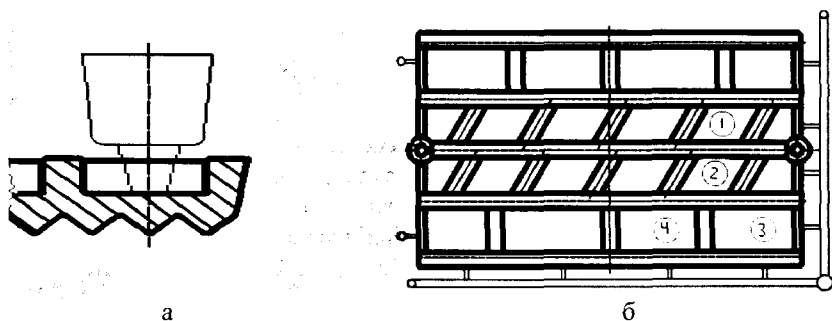


Рис. 2. Варианты установки прямой прибыли:  
а – конструкция прибыли; б – вариант установки прибыли от 1 до 4

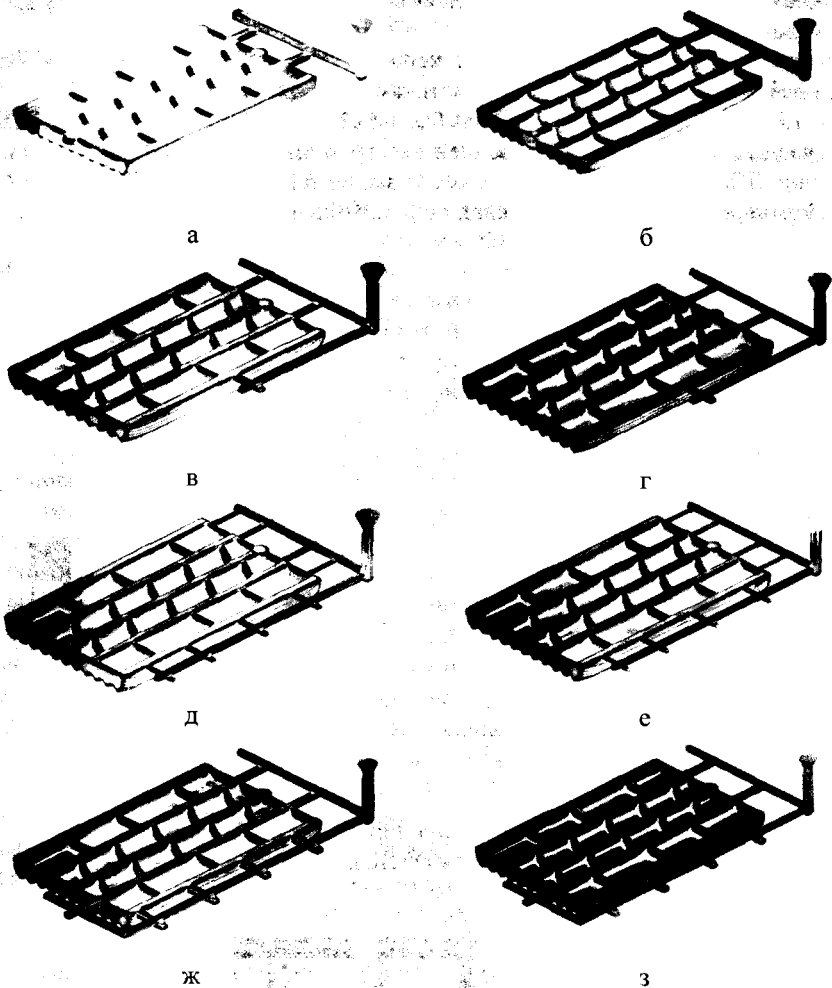
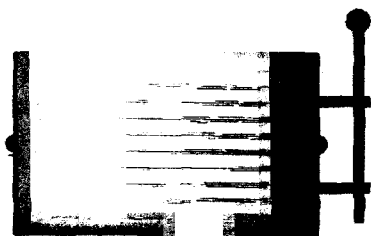


Рис. 3. Характер изменения температуры остывающих плит:  
 а, б – через 300 и 400 с после заполнения формы по I-ЛС;  
 в, г – через 300 и 400 с после заполнения формы по V-ЛС;  
 д, е – через 300 и 400 с после заполнения формы по Г-ЛС;  
 ж, з – через 300 и 400 с после заполнения формы по С-ЛС

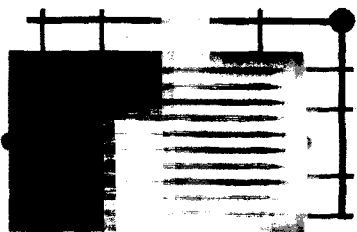




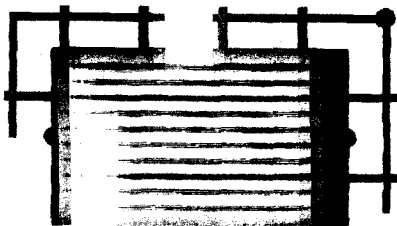
а



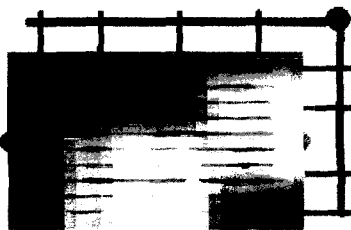
б



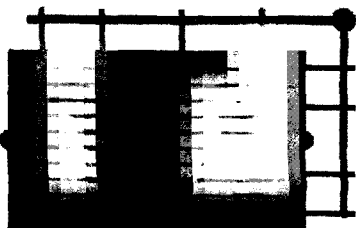
в



г



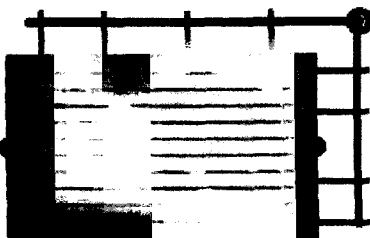
д



е



ж



з

Рис. 4. Характер распределение жидкой фазы в конце затвердевания плиты: а – при I-ЛС; б – при V-ЛС; в – при Г-ЛС; г – при С-ЛС; д – при Г-ЛС и прибылью (вариант 1); е – при Г-ЛС и прибылью (вариант 2); ж – при Г-ЛС и прибылью (вариант 3); з – при Г-ЛС и прибылью (вариант 4)

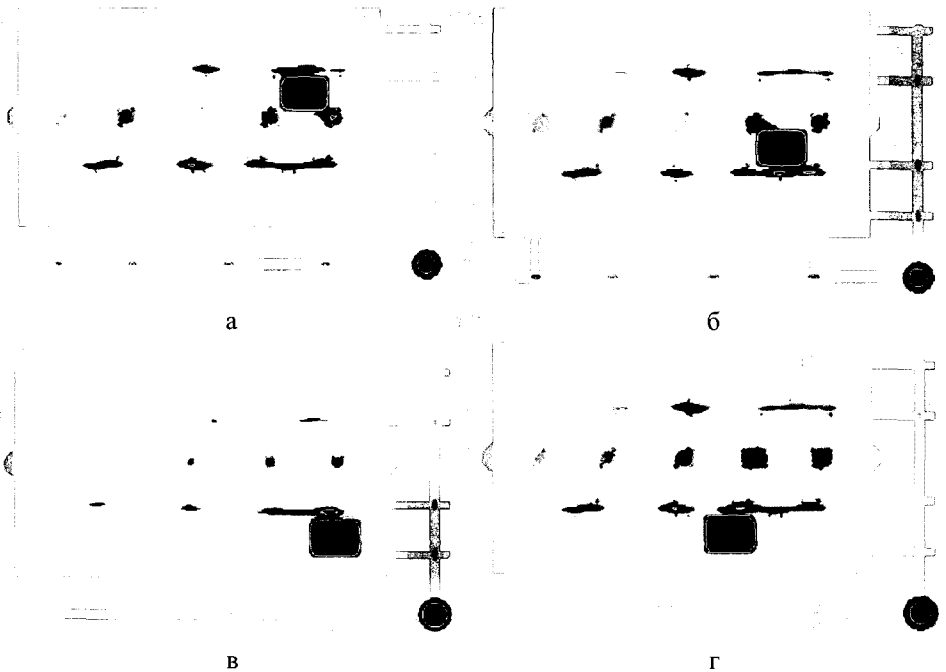


Рис. 5. Усадочные дефекты в плите: а – при Г-ЛС и прибылью (вариант 1); б – при Г-ЛС и прибылью (вариант 2); в – при Г-ЛС и прибылью (вариант 3); г – при Г-ЛС и прибылью (вариант 4)

Из приведенных данных видно, что наилучшим вариантом с позиций формирования усадочных дефектов является технология с I-ЛС, а наилучшим – технология с Г-ЛС и угловой прибылью (вариант 3). Причем в последнем случае четко прослеживается направленное затвердевание плиты вдоль диагонали по направлению к стояку. Поэтому дальнейшие экспериментальные исследования новой конструкции ГЛС проводили по двум вариантам: I-ЛС (базовый) и Г-ЛС (разработанный).

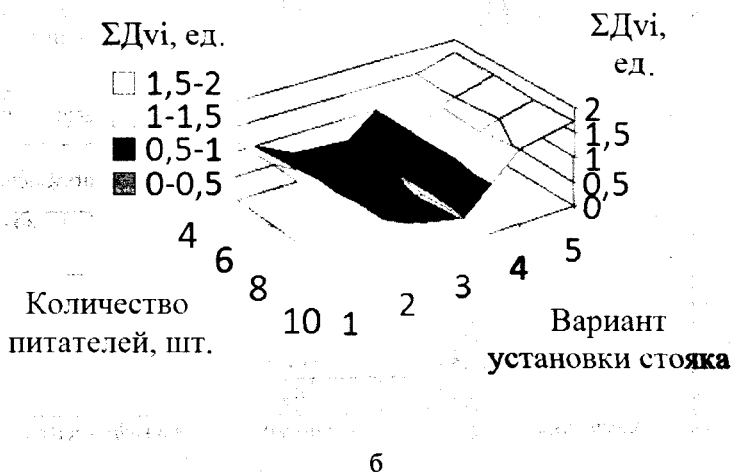
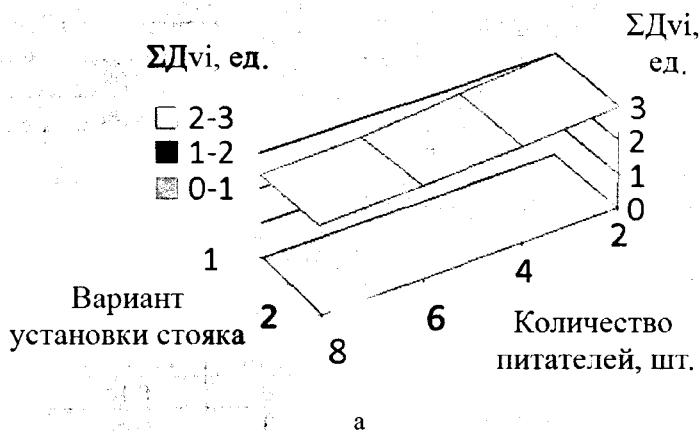
В условиях литейного цеха ЧЭМК изготавливали плиты (легкие, средней массы, массивные) и варьировали количеством питателей, местом установки стояка на шлакоуловителе, объемом и местом установки прибыли.

Стояк размещали по краям и в середине ветвей шлакоуловителя, а также в месте его изгиба (всего пять вариантов установки).

По разработанной методике в технологических картах оценивали: степень коробления  $Sk$  (мм), наличие трещин  $Tt$  (протяженность трещины в мм), утяжина  $Ut$  ( $см^3/дм^2$ ). Для оценки суммарного показателя дефектности отливки ( $\Sigma Dv_i$ ) значения каждого из указанных были приведены к нормированному безразмерному виду ( $Dv_1, Dv_2, Dv_3$ ): минимальному значению дефекта присвоили коэффициент

0, а максимальному – 1). Температура заливки стали находилась в интервале  $T_{зал} = 1380... 1450^{\circ}\text{C}$ .

Результаты экспериментов представлены на рис. 6 и в табл. 1–3.



**Рис. 6.** Результаты исследования предложенной конструкций ЛС для плиты средней массы: а – базовой вариант ЛС; б – разработанный вариант ЛС

Таблица 1

Влияние объема прибыли и местоположения на  $Dv_3$  (Ut) в легкой плите

Вариант установки прибыли	Объем утяжины в плите $Dv_3$ для разных объемов прибыли, ед*				
	2 000 см <sup>3</sup>	4 500 см <sup>3</sup>	6 500 см <sup>3</sup>	9 000 см <sup>3</sup>	11 500 см <sup>3</sup>
1	0,36	0,28	0,11	0,03	0,00
2	0,30	0,10	0,04	0,00	0,00
3	0,10	0,16	0,00	0,00	0,00
4	0,42	0,39	0,04	0,00	0,00
5	0,35	0,40	0,03	0,04	0,00

\* максимальному объему утяжины в 0,95 см<sup>3</sup>/дм<sup>2</sup> соответствует коэффициент 1

Таблица 2

Влияние объема прибыли и местоположения на  $Dv_3$  (Ut) в плите средней массы

Вариант установки прибыли	Объем утяжины в плите $Dv_3$ для разных объемов прибыли, ед*				
	4 000 см <sup>3</sup>	9 000 см <sup>3</sup>	13 000 см <sup>3</sup>	18 000 см <sup>3</sup>	23 000 см <sup>3</sup>
1	0,62	0,51	0,20	0,10	0,00
2	0,51	0,41	0,10	0,00	0,00
3	0,41	0,30	0,00	0,00	0,00
4	0,72	0,68	0,10	0,00	0,00
5	0,79	0,72	0,31	0,10	0,00

\* максимальному объему утяжины в 0,95 см<sup>3</sup>/дм<sup>2</sup> соответствует коэффициент 1

Таблица 3

Влияние объема прибыли и местоположения на  $Dv_3$  (Ut) в массивной плите

Вариант установки прибыли	Объем утяжины в плите $Dv_3$ для разных объемов прибыли, ед*				
	9 000 см <sup>3</sup>	19 000 см <sup>3</sup>	29 000 см <sup>3</sup>	39 000 см <sup>3</sup>	49 000 см <sup>3</sup>
1	0,16	0,83	0,55	0,46	0,20
2	0,74	0,66	0,12	0,66	0,00
3	0,70	0,34	0,07	0,00	0,00
4	0,89	0,88	0,40	0,07	0,00
5	0,94	0,89	0,64	0,38	0,07

\* максимальному объему утяжины в 0,95 см<sup>3</sup>/дм<sup>2</sup> соответствует коэффициент 1

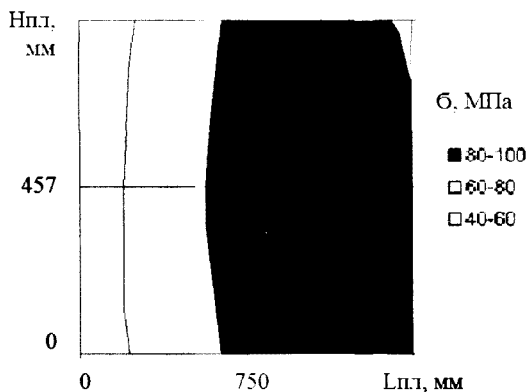
По экспериментальным данным (см. рис. 6) определено, что нижняя граница значения  $\Sigma Dvi$  при базовой ЛС составляет 2,0...2,2 ед, а при разработанном варианте ЛС значения  $\Sigma Dvi$  на порядок ниже – 0,45 ед. (для легкой плиты  $\Sigma Dvi = 0,14$  ед., для массивной  $\Sigma Dvi = 0,39$  ед.). При этом разработана ЛС полностью предотвращает процесс трещинообразования плиты на стадии заковки. По данным табл. 1–3 определен минимальный объем угловой прибыли, который полностью ис-

ключает утяжину: для легкой плиты – 6 500 см<sup>3</sup>; плиты средней массы – 13 000 см<sup>3</sup>; массивной плиты – 39 000 см<sup>3</sup>.

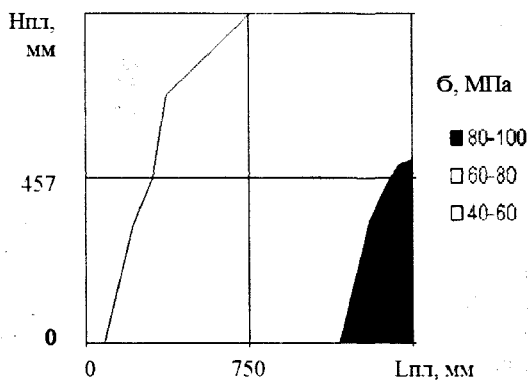
В результате проведенных экспериментальных исследований разработана новая ЛПС, обеспечивающая повышенное качество изготовления плит при увеличенном ТВГ: для легкой плиты на 11%; для плиты средней массы на 16%; для массивной плиты на 20%. Ресурсосберегающая ЛПС имеет Г-образный шлакоуловитель со стояком в месте изгиба, по шесть питателей для легкой и массивной плиты, и по 8 питателей для плиты средней массы, а также уменьшенную в 3 раза угловую прибыль по сравнению с известными технологическими решениями.

В четвертой главе изучен характер затвердевания плиты, изготовленной по разработанной технологии, методом планирования эксперимента создана математическая модель и оптимизированы технологические параметры.

После измерения в двенадцати точках температуры плиты, остывающей в форме, были рассчитаны поля термических напряжений, рис. 7.



а



б

**Рис. 7.** Поле термических напряжений в плите средней массы:  
а – базовая ЛС; б – разработанная ЛПС

Результаты вычислений согласуются с экспериментальными фактами коробления плит: при базовой ЛС ось коробления располагается поперек тела отливки со смещением к питателям, а при разработанной ЛПС – вдоль диагонали.

Для определения термических напряжений на стадии закалки плиты  $\Delta T_1$  использовали компьютерный расчет в системе LVMFlow. По результатам расчета оказалось, что значения  $\sigma^{zak}$  (550...650 МПа) меньше предела прочности стали 110Г13Л, хотя в случае использования технологии с базовой ЛС плита растрескивалась вдоль оси коробления.

Поэтому было проведено ультразвуковое сканирование плиты (рис. 8). Выявлено, что разработанная ЛПС снижает образование усадочных пустот в теле отливки и они располагаются рассредоточено. При базовом варианте объем пустот в теле отливки больше и наиболее крупные из них располагаются вдоль поперечной оси коробления.

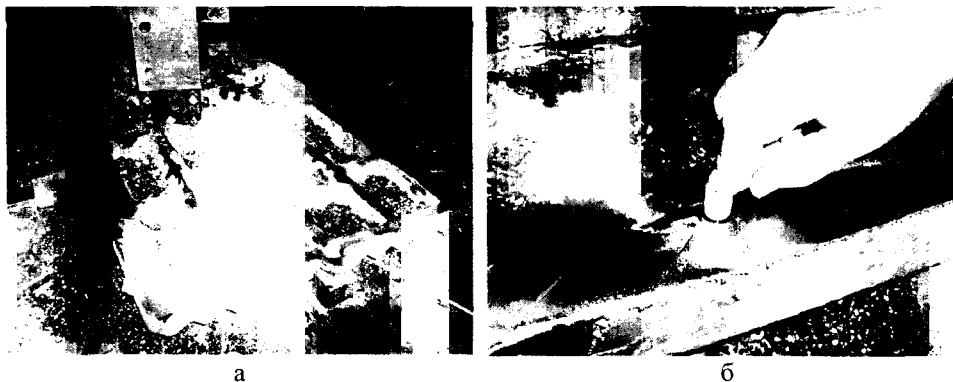


Рис. 8. Ультразвуковое исследование плиты УДЗ 103 PELENG:  
а – фрезеровка поверхности плиты; б – процесс сканирования экспериментальной плиты совмещенным пьезоэлементом в одной из 25 точек

Дополнительно к ультразвуковому исследованию был проведен анализ структуры литых образцов, которые получали из специально залитых с плитой выпоров. Выпоры были размещены по разные стороны осей коробления литой детали на расстоянии 500 мм. Фотографии микроструктур, полученные на ПАК Thixomet, представлены на рис. 9.

Из исследуемых структур видно, что плита при разработанной ЛПС формируется с однородной кристаллической структурой. К тому же при высоких температурах заливки стали и повышенном содержании фосфора в шихте разработанная ЛПС снижает влияние концентраторов напряжения – карбидов и нерастворимой фосфидной фазы (по результатам исследования на РЭМ JOEL JSM-64600LV).

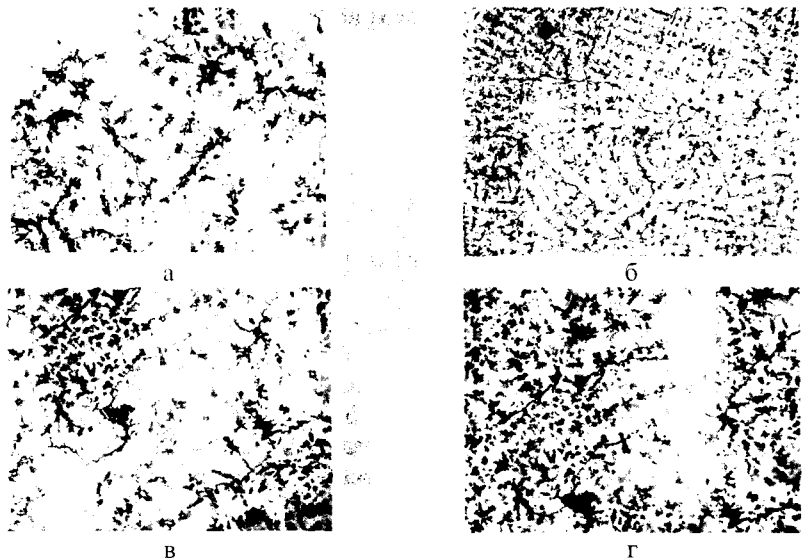


Рис. 9. Литая микроструктура стали 110Г13Л (x100): а – основание выпора слева от оси коробления (базовая ЛС); б – основание выпора справа от оси коробления (базовая ЛС); в – основание выпора слева от оси коробления (разработанная ЛПС); г – основание выпора справа от оси коробления (разработанная ЛПС)

Проведенный анализ структуры плит позволил установить характер затвердевания плиты по разработанной ЛПС. Из-за интенсивного перемешивания расплава один из углов полости формы разогревается. В результате этого перед началом затвердевания температурное поле отливки приобретает такие значения, при которых затвердевание начинается с противоположного стояку угла плиты. Фронт кристаллизации сплава перемещается вдоль диагонали отливки. Следствием этого процесса является перераспределение термических напряжений и уменьшение деформации плиты. Обеспечение принципа направленного затвердевания приводит к формированию плотной структуры отливки с однородным зерном и рассредоточенными концентраторами напряжений.

Методом планирования эксперимента получены регрессионные модели разработанной технологии. Например, для плиты средней массы:

$$Y_1 = 1,750 + 0,750x_1 + 1,000x_2; \quad (1)$$

$$Y_2 = 0,206 + 0,068x_1 - 0,077x_3 + 0,061x_1x_3; \quad (2)$$

$$Y_3 = 5667,28 - 1,041x_1 - 0,958x_2; \quad (3)$$

где  $x_1$  – суммарная площадь узкого сечения ЛС;  $x_2$  – температура заливки стали;  $x_3$  – объем угловой прибыли,  $Y_1$  – степень коробления;  $Y_2$  – утяжина;  $Y_3$  – ресурс плиты на истирание. Полученные модели позволяют оптимизировать параметры разработанного технологического процесса и сделать его управляемым.

В пятой главе приведены результаты испытаний и внедрения в производственный цикл разработанной технологии литья плит из стали Гадфильда в разовую песчано-глинистую форму (ОАО «Челябинский электрометаллургический комбинат»). За счет снижения брака, повышения ТВГ и увеличения срока эксплуатации литых изделий суммарный годовой экономический эффект составил 4,3 млн. руб. (в ценах 2008 г.).

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Выявлены существенные недостатки в существующих технологиях литья плит из высокомарганцовистой стали в разовые песчано-глинистые формы. Для обеспечения направленного затвердевания известные технологии требуются выполнения значительных напусков по высоте отливки или переворачивание формы на 120°...180°. При этом условие использования массивных прибылей является обязательным. Из-за операций манипулирования формой повышается трудоемкость процесса, требуется дополнительное оборудование на участки заливки, а значительный расход жидкого металла на литники и прибыли снижает показатель ТВГ до 45...55%.

2. Разработана модель и создана методика оценки дефектности отливок, включающая составление на каждую плиту каталога и карты. Дефекты оцениваются в виде объема, приходящихся на единицу поверхности плиты, количества дефектов на единицу поверхности; степени коробления, отсутствия или наличие трещины. В модели значимыми признаются явные дефекты размером в свету более 20 мм, высотой и глубиной более 2 мм. Утяжины, коробления и трещины считали критериальными дефектами, поскольку именно эти параметры плиты связаны с ее сроком эксплуатации. Данная методика полностью формализует этап контроля качества выпускаемой литейным цехом продукции.

3. Разработаны типы исследуемых конструкций литноково-питающих систем, исключающие дополнительные манипуляции с залитой формой и увеличивающие технологический выход годного свыше 70%. Введена классификация плоских оребренных плит, широко используемых в дробильных установках: «легкая плита» – размерами 1165x950x100 мм и массой 450 кг; «плита средней массы» – размерами 1500x915x150 мм и массой 850 кг; «массивная плита» – размерами 1080x1045x250 мм и массой 1200 кг.

4. В результате компьютерного моделирования процесса заливки формы с разным способом подвода расплава и с разными вариантами прямой прибыли установлено, что наилучший базовый тип ЛС имеет I-образным шлакоуловитель, а наилучший разработанный тип ЛПС включает Г-образный шлакоуловитель и угловую прибыль. Установлены закономерности влияния элементов конструкции базовой ЛС и разработанной ЛПС на коробление плит, трещинообразование и формирование утяжины. Параметрами рациональной ЛПС являются: Г-образный шлакоуловитель со стояком в месте изгиба, по 6 питателей для легкой и массивной плиты и по 8 – для плиты средней массы. Определены рациональные соотно-



шениями сечений разработанной ЛС: для легкой плиты –  $\Sigma W_{п} : \Sigma W_{шл} : \Sigma W_{ст} = 19:21:21 \text{ см}^2 = 0,9 : 1,0 : 1,0$ ; для плиты средней массы –  $\Sigma W_{п} : \Sigma W_{шл} : \Sigma W_{ст} = 34:31:31 \text{ см}^2 = 1,1 : 1,0 : 1,0$ ; для массивной плиты –  $\Sigma W_{п} : \Sigma W_{шл} : \Sigma W_{ст} = 36:33:33 \text{ см}^2 = 1,1 : 1,0 : 1,0$ . Эффективное размещение прямой прибыли признано в угловой части плиты возле стояка, что полностью исключает образование дефекта утяжины. ТВГ увеличен в 1,5...1,7 раз.

5. Экспериментально зафиксировано направленное затвердевание расплава в полости формы, при заливке через разработанную ЛПС, характеризующееся перемещением фронта кристаллизации по диагонали отливки к стояку. Оценены термические напряжения в плите и установлены особенности ее деформации: при базовой ЛС – ось коробления располагается поперек тела отливки со смещением к питателям, а при разработанной ЛПС – ось коробления размещена вдоль диагонали. Ультразвуковым сканированием также выявлено сниженное количество усачных пустот в теле отливки при заполнении формы по разработанной ЛПС.

6. На основании анализа макро- и микроструктуры литых образцов залитых с плитой, определено различие в кристаллическом строении: плита с разработанной ЛПС образуется с однородной кристаллической структурой, а плита с базовой ЛС имеет крупнозернистую область вдоль оси коробления.

7. Установлен характер затвердевания плиты, полученной при разработанной технологии. В следствии диагонального перемещения фронта затвердевания отливки перераспределяются термические напряжения и уменьшается деформации плиты. Благодаря направленному затвердеванию отливки она формируется с плотной структурой, однородным зерном и рассредоточенной пористостью.

8. Регрессионным анализом установлена значимость факторов разработанной технологии на степени коробления ( $Sk$ ) и утяжину ( $Ut$ ) и ресурс плиты ( $Rs$ ): уменьшением суммарного узкого сечения литниковой системы ( $\Sigma W_{уз}$ ), температуры заливки ( $T_{зал}$ ), и совместным снижением  $\Sigma W_{уз}$  с объемом угловой прибыли достигается снижение  $Sk$  и  $Ut$ ; к увеличению рабочего ресурса плиты приводит снижение  $\Sigma W_{уз}$  и  $T_{зал}$ ; снижением  $T_{зал}$  уменьшается утяжина в отливке. В случае построения регрессионной модели технологии для легкой плиты коэффициенты при факторах  $\Sigma W_{уз}$  и  $T_{зал}$  противоположны по знаку.

9. В результате решения оптимизационных задач поучены следующие параметры разработанной ЛПС,  $\Sigma W_{уз}^{онт}_{л} = 23,00 \text{ см}^2$ ,  $T_{зал}^{онт}_{л} = 1420^{\circ}\text{C}$ ,  $V_{пр}^{онт}_{л} = 7500 \text{ см}^3$ ; для плиты средней массы –  $\Sigma W_{уз}^{онт}_{см} = 28,00 \text{ см}^2$ ,  $T_{зал}^{онт}_{см} = 1380^{\circ}\text{C}$ ,  $V_{пр}^{онт}_{см} = 15\ 000 \text{ см}^3$ ; для массивной плиты –  $\Sigma W_{уз}^{онт}_{м} = 33,00 \text{ см}^2$ ,  $T_{зал}^{онт}_{м} = 1380^{\circ}\text{C}$ ;  $V_{пр}^{онт}_{м} = 41\ 000 \text{ см}^3$ .

10. Разработанная технология прошла успешные испытания и в внедрена в производственный цикл ОАО «ЧЭМК» с экономическим эффектом в 4,3 млн. руб. (в ценах 2008 г.). Повышено качество плит к дробилки СМД-110А и чешской дробилки В9-2Н, увеличен срок их эксплуатации в 1,7...2,1 раза. Анализ номенклатуры выпускаемых в цехе литых плит и их конструкции выявил зависимость, устанавливающую связь между массой плиты и соотношениями сечений ЛС. С учетом выявленной зависимости разработана компьютерная программа синтеза технологических параметров «Литая плита» и автоматизировано рабочее место технолога.

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ  
ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

1. Ласьков, Н.А. Влияние конструкции и положения горизонтальных литниковых систем на дефектность литых плит / Н.А. Ласьков, А.В. Карпинский, В.М. Ткачев // *Литейщик России*. – 2009. – № 6. – С. 36 – 40.

2. Ткачев, В.М. О критериях оценки дефектности отливок / В.М. Ткачев // *Неметаллические включения и газы в литейных сплавах: тезисы докладов 12-й Международной научно-технической конференции*. – Запорожье: Изд-во ЗНТУ, 2009. – С.84 – 88.

3. Ласьков, Н.А. Дефектность литых ассиметрично оребренных литых плит из стали 110Г13Л / Н.А. Ласьков, А.В. Карпинский, В.М. Ткачев // *Литейщик России*. – 2009. – № 12. – С. 29 – 31.

4. Ермаков, И.Н. Влияние местоположения прибыли на качество изготовления крупногабаритных дробящих плит / И.Н. Ермаков, В.М. Ткачев // *Наука и технология. Том 1. Краткие сообщения XXX Российской школы, посвященной 65-летию Великой Победы*. – Екатеринбург: УрО РАН, 2010. – С. 54 – 56.

5. Опыт использования компьютерного анализа для совершенствования литниково-питающей системы / И.Н. Ермаков, В.М. Ткачев, В.В. Новокрещенов, П.К. Мурашкин // *Наука и технология. Том 2. Краткие сообщения XXX Российской школы, посвященной 65-летию Великой Победы*. – Екатеринбург: УрО РАН, 2010. – С. 193 – 195.

6. Ткачев, В.М. Влияние положения стояка на коробление и дефектность отливок-плит / В.М. Ткачев, Н.А. Ласьков, И.Н. Ермаков // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2010. – № 6. – С. 9 – 10.

7. Ермаков, И.Н. Технологические особенности изготовления крупногабаритных плит из стали Гадфильда / И.Н. Ермаков, В.М. Ткачев // *Литейное производство сегодня и завтра: тезисы докладов 8-й Всероссийской научно-практической конференции*. – СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2010. – С. 253 – 256.

8. Ермаков, И.Н. Исследование процесса изготовления литой плиты методом планируемого эксперимента / И.Н. Ермаков, В.М. Ткачев // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия»*. – 2010. – Вып. 15. – №34 (210). – С. 46–49.

9. Ермаков, И.Н. Новая технология литья стальных плит дробильных установок ферросплавного производства / И.Н. Ермаков, В.М. Ткачев // *Современные проблемы электрометаллургии стали: сб. материалов тезисов XIV Международной конференции*. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – С. 241 – 244.