

*На правах рукописи*



**Посламовская Юлия Александровна**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
МЕРОПРИЯТИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПОВЫШЕНИЕ  
КАЧЕСТВА НИЖНЕЙ ЧАСТИ СЛИКОВ  
ДЛЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ  
ТЯЖЕЛОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Специальность 05 16 02

«Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Волгоград – 2008

Работа выполнена на кафедре Технологии материалов Волгоградского государственного технического университета

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор

**ЖУЛЬЕВ Сергей Иванович**

Официальные оппоненты

доктор технических наук

Паршин Валерий Михайлович

кандидат технических наук, доцент

Ивлев Сергей Алексеевич

Ведущее предприятие

ЗАО «Волгоградский Металлургический  
Завод «Красный октябрь»

Защита состоится "5" июня 2008 г в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 217 035 02 в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им И П Бардина» по адресу 105005, Москва, 2-я Бауманская ул , д 9/23

С диссертацией можно ознакомиться на сайте [www.chermet.net](http://www.chermet.net) и в научно-технической библиотеке ФГУП «ЦНИИчермет им И П Бардина»

Автореферат разослан "30" апреля 2008г

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 217 035 02 , к т н



Т П Москвина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Развитие отечественного машиностроения ставит задачу повышения качества крупногабаритных изделий ответственного назначения, которые находят широкое применение в энергетической, химической отраслях промышленности, а также в судо- и машиностроении. Для изготовления крупных поковок необходимы кузнечные слитки массой от 10 до 200 т.

Получение высококачественных тяжелых слитков осложнено большими трудностями экспериментального исследования закономерностей процесса кристаллизации металла и ограниченностью публикаций, освещающих результаты исследования крупных стальных слитков.

Высокое качество поковок обуславливается отсутствием металлургических дефектов, равномерностью физико-механических свойств, высоким выходом годного и может быть достигнуто только при условии достаточного качества исходного слитка. Затвердевание крупных объемов металла сопровождается значительным развитием структурной и химической неоднородностей, внутренними и поверхностными дефектами, скоплениями вредных примесей и неметаллических включений. Причем с увеличением массы кованных деталей, обусловленным постоянным увеличением мощностей агрегатов и, соответственно, слитков для их производства, усиливается неоднородность металла и его пораженность различного рода дефектами.

Практика производства заготовок из кузнечных слитков свидетельствует о том, что одним из дефектов, как правило, приводящим к отбраковке готового изделия на стадии сдаточного контроля, являются неметаллические включения в нижней части поковки. Отдельные крупные включения или скопления более мелких включений выявляются методом ультразвуковой дефектоскопии и видны невооруженным глазом на дисках металла, отобранных для макроконтроля по месту дефекта. Различия в структуре кристаллической решетки и свойствах включений и основного металла становятся причиной образования несплошностей и трещин в теле поковки, что приводит к образованию шиферного или древовидного изломов и отбраковке изделия.

Совершенствование технологии производства стальных слитков с целью повышения их качества должно проводиться на основе современных представлений о механизме процесса затвердевания стали и формирования слитка. В связи с этим актуально комплексное углубленное исследование дендритного строения и дефектов кристаллической структуры кузнечных слитков, а также поиск новых эффективных путей улучшения качества металла, прежде всего, за счет повышения его чистоты.

Диссертационная работа выполнена в рамках проекта Министерства промышленности, науки и технологии 6/354-03 «Разработка технологии производства металлургических заготовок повышенной однородности для изделий тяжелого машиностроения» (2003 г.) по распоряжению №3 900/41-68 от 26 марта 2003 года, а также при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований проект № 07-08-0051 от 02 апреля 2007 года «Изучение фундаментальных закономерностей формирования дефектов при кристаллизации сверхкрупных металлических тел» (2007 г.).

**Цель работы.** Повышение качества слитков для ответственных изделий тяжелого машиностроения на основе изучения особенностей кристаллической структуры конуса осаждения и разработки новых технологических мероприятий по сокращению дефектов нижней части кузнечных слитков.

В соответствии с поставленной целью были решены следующие задачи:

— Изучено кристаллическое строение и определен химический состав дефектной области и прилегающих объемов металла поковок конструкционных марок стали

49

— Исследованы морфология, природа и характер расположение неметаллических включений в дефектной зоне металла поковок

— Проведен анализ структурных и ликвационных зон нижней части стальных слитков различной массы, геометрии и технологических параметров разливки

— Проведены детальные исследования, направленные на уточнение механизма формирования конуса осаждения в нижней части стальных слитков и прилегающих к нему объемов металла

— Установлены причины образования дефектов в теле поковки, выявляемых методом ультразвуковой дефектоскопии, и предложен способ их устранения

**Методы исследований** Экспериментальная часть работы выполнена с применением методов оптической и растровой микроскопии OLYMPUS 61, NEOPHOT NU2/E, МИН-4, МНО-2, твердомера ЗИП ТШ-2М, стандартной методики определения плотности дендритной структуры, а также разработанных новых оригинальных методик моделирования процесса кристаллизации слитка с использованием компьютерных программ Исследование химической неоднородности проводилось на фотоэлектрической установке ARL 3460 Metals Analyzer Природа и строение дефектов изучались на образцах, отобранных с поковок, не прошедших ультразвуковой контроль

### **Научная новизна**

1 Установлено зонное строение конуса осаждения, обусловленное различными условиями затвердевания свободно растущих изолированных кристаллов в нижней части стальных слитков независимо от их массы, геометрии и способов разливки

2 Определено существование переходной зоны в донной части стальных слитков, наличие которой свидетельствует о реализации как последовательного, так и объемного механизмов кристаллизации в процессе их затвердевания

3 Выявлено наличие единичных крупных кристаллов в объеме мелкокристаллической области конуса осаждения, параметры которых идентичны равноосным кристаллам бокового фронта затвердевания вышележащих горизонтов слитка

4 Показана возможность оптимального расположения зон дугообразных трещин и внеосевой ликвации посредством регулирования доли объемной кристаллизации

### **Основные положения, выносимые на защиту**

— результаты исследования и сравнительный анализ кристаллической структуры и ликвационной неоднородности нижней части стальных слитков различной массы, геометрии и способов разливки,

— результаты моделирования влияния геометрических и технологических параметров стальных слитков на структурную неоднородность и размеры конуса осаждения литых заготовок,

— результаты металлографического исследования характера и природы дефектов, выявляемых методом УЗК в нижней части поковки

**Практическая ценность** В результате исследования кристаллического строения и уточнения механизма структурообразования стального слитка установлены характер и природа дефектов, выявляемых ультразвуковым контролем в теле поковки – это металлические настыли, образующиеся на торцевой части направляющей трубы при разливке металла, которые, попадая в кристаллизующийся расплав, переносятся в донную часть слитка Разработаны мероприятия, направленные на устранение данного типа дефекта, за счет использования противопригарных, огнеупорных покрытий, понижающих смачиваемость и повышающих стойкость огнеупорных колец направляющих труб и разливочных стаканов Усовершенствование процесса разливки позволило исключить появление макродефекта «светлая корочка» в нижней части слитка

Внедрение усовершенствованной технологии отливки стальных слитков с использованием огнеупорной алюмохромовфосфатной обмазки на ФГУП ПО «Баррикады» (г. Волгоград) дало экономический эффект 970,2 тыс. руб. за счет устранения брака, вызванного появлением дефектов с первого конца поковки.

**Апробация работы.** Материалы диссертационной работы докладывались на 6 международных конференциях (Магнитогорск 2005г., 2007г., Самара 2005г., Казань 2006г., Новосибирск 2006г., Нижний Новгород 2006г.), а также на ежегодных научно-технических конференциях ВолГТУ (2004–2007 гг.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ, в том числе 2 статьи в центральных рецензируемых журналах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка литературных источников и приложения, содержит 170 страниц машинописного текста, 108 рисунков, 21 таблица, список литературы из 123 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** кратко раскрыты сущность и актуальность рассматриваемых научно-технических проблем. Изложены структура работы, научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

**В первой главе** рассмотрены существующие теории процесса кристаллизации стального слитка, описаны основные закономерности формирования кристаллической структуры, дефектов усадочного и ликвационного происхождения литого металла. Кроме того, проведен анализ причин повышенной загрязненности нижней половины слитка грубыми шлаковыми и неметаллическими включениями, скопления которых приводят к отбраковке готовых изделий по результатам ультразвуковой дефектоскопии.

Несмотря на большое количество исследований, как в отечественной, так и в зарубежной литературе, до сих пор отсутствует единство взглядов по основным вопросам кристаллизации слитка. В настоящее время существуют две гипотезы, объясняющие образование кристаллических зон в стальном слитке. Одни исследователи (Диккенсон И.Х., Иванцов Г.П., Штейнберг С.С., Скобло С.Я., Тамман Г., Ефимов В.А., Малиночка Я.Н.) исходят из положения, что затвердевание слитка происходит как путем роста кристаллов от охлаждаемой поверхности, так и путем образования отдельных изолированных кристаллов, перемещение которых в объеме жидкой стали налагает серьезный отпечаток на всю картину макростроения слитка. Сторонники другой точки зрения (Гуляев Б.Б., Ойкс Г.Н., Сокольская Л.И., Тагеев В.М., Гудцов Н.Т.) либо вообще отрицают возможность образования изолированных кристаллов при затвердевании слитка, либо, допуская принципиальную возможность такого процесса, отрицают его существенное влияние на строение слитка. Ключевым вопросом каждой из гипотез об образовании кристаллических зон является объяснение механизма формирования конуса осаждения.

Строение нижней части стальных слитков характеризуется рядом особенностей:

- донная часть слитков образована мелкими равноосными кристаллитами, скопление которых имеет форму конуса,

- нижний конус слитков отличается пониженным количеством примесей по сравнению с исходным содержанием в расплаве, причем тем в большей степени, чем крупнее слиток,

- в области конуса осаждения стального слитка расположены скопления крупных неметаллических включений.

Анализ литературных данных показывает, что согласно теории последовательной кристаллизации мелкокристаллическая структура нижнего конуса определяется

высокой теплоаккумулирующей способностью массивного поддона. Однако в работах не приводятся аргументированные экспериментальные исследования, позволяющие объяснить все особенности строения конуса осаждения.

Особенности в строении нижней части слитков в полной мере раскрывает теория объемной кристаллизации. В силу способности металла к переохлаждению, образование изолированных кристаллов в объеме жидкого расплава термодинамически возможно. Однако до сих пор нет систематизированных исследований, подтверждающих осадочный механизм формирования нижнего конуса.

Выявление закономерностей затвердевания жидкого металла в изложнице позволяет определить возможности управления кристаллической структурой стального слитка и способствует установлению характера и природы дефектов, формирующихся в процессе его кристаллизации. Результаты многократных исследований показывают, что более 90% дефектов, выявляемых при штатном контроле заготовок, имеют металлургическое происхождение и зависят от качества металла исходного слитка – это рыхлости, несплошности, химическая неоднородность, повышенная загрязненность неметаллическими включениями.

Для установления причин появления таких дефектов, как светлые пятна, скопления шлаковых и неметаллических включений в конусе осаждения, необходимо комплексное углубленное исследование его кристаллической структуры. Разработка мероприятий, направленных на устранение дефектов макроструктуры нижней части стального слитка, будет способствовать более полному переходу слитка в поковку и сокращению донной обрезки.

Во второй главе приведены сведения о материале исследования и схемы отливки изученных стальных слитков массой от 1,7 до 24,2 т с различным отношением высоты к среднему диаметру ( $H/D$  от 1,9 до 4,59). Слитки массой менее 7 т разливались на воздухе в разливочной канаве с использованием промежуточной воронки, обеспечивающей постоянную скорость поступления металла в изложницу и центрирование струи. Крупные слитки отливались через промежуточный ковш в вакуумной камере по различным технологиям с инокулирующей струей, с доливкой прибыли и обычной технологии. Для образования инокуляторов в струе металла непосредственно в процессе разлива использовали огнеупорную трубу со специальными насечками. Доливку прибыльной части слитка осуществляли спустя 62 минуты после заливки его тела. Процесс выплавки доливаемого металла был аналогичен основному. В целях минимизации количества литейной оснастки увеличение параметра  $H/D$  добивались соосной установкой стандартных изложниц.

Описана методика исследования химической неоднородности и предложена методика исследования макроструктуры металла слитков с применением современной компьютерной техники. По совокупности параметров (количеству кристаллов и их объемной доле, длине и углу наклона к горизонтали наибольших осей дендритов) определялись границы структурных зон.

Описана математическая модель Crystal, использованная для моделирования процессов затвердевания слитков. Опираясь на результаты металлографических исследований, программа осуществляет построение многоцветных плоских графических полей температурного, плотностного и структурных зон слитков. Эти графики могут быть получены для любого момента времени, начиная от начала кристаллизации и заканчивая полным затвердеванием.

Описана методика металлографического исследования металла, вырезанного по месту дефекта, выявленного методом УЗК. Изучалась форма, цвет, прозрачность, степень анизотропии и расположение включений в дефектной области и здоровом металле. Включения и микроструктуру исследовали под микроскопом NEOPHOT NU2/E и МИМ-8 и фотографировали с использованием OLYMPUS BX21. Состав сложных гетерогенных включений идентифицировали методом петрографического

анализа на поляризационном микроскопе МИН-4

Приведена методика определения краевого угла смачивания жидкого расплава и огнеупорных футеровок с покрытием АХФС с использованием высокотемпературного микроскопа МНО-2

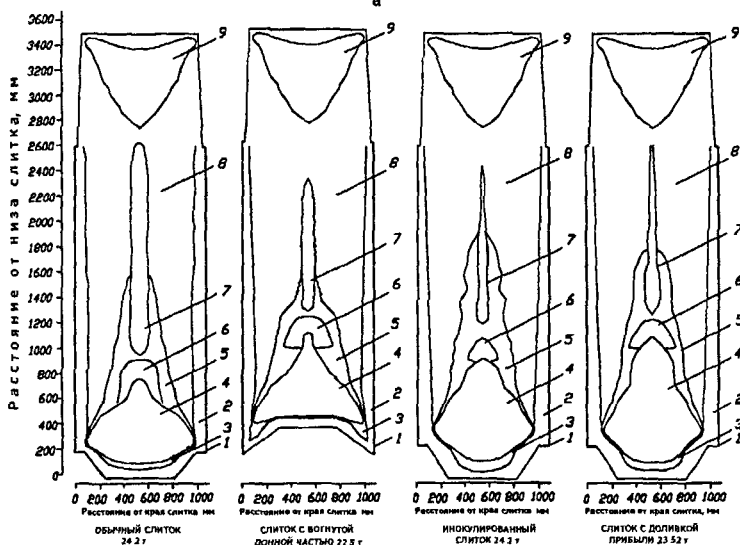
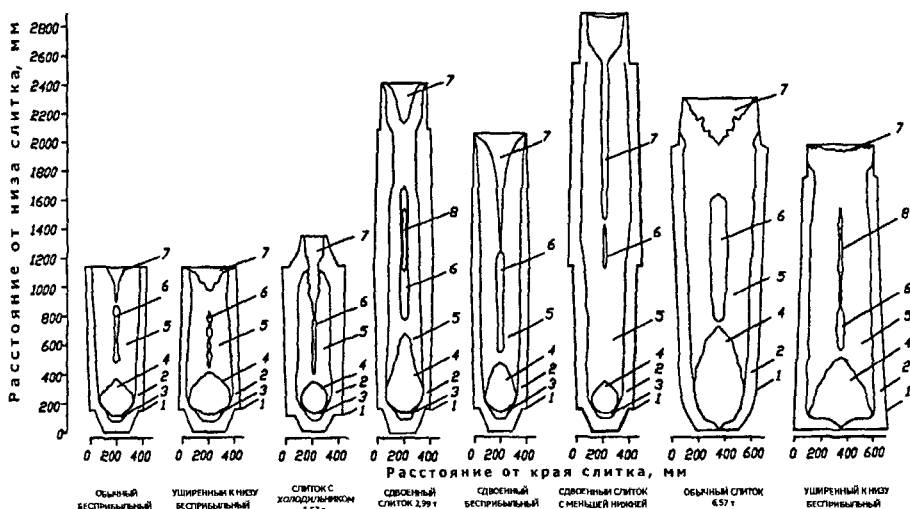
**В третьей главе** представлены результаты исследования кристаллического строения и химической неоднородности нижней части стальных слитков различной массы (от 1,7 до 24,2 т), геометрии ( $H/D \sim 1,9 - 4,59$ ) и технологических параметров разливки

Структурные зоны стальных слитков представлены на рисунке 1

Показано, что при прочих равных условиях в слитках, отлитых в изложницы с разным отношением высоты к диаметру, но с одинаковыми параметрами и геометрией их донной части (рис 1 а, табл 1), мелкокристаллическая область конуса осаждения имеет различную протяженность

**Таблица 1 Влияние геометрических параметров слитка и способа разливки на величину конуса осаждения**

Тип слитка	Марка стали	$m_{сл}/m_{кон}$ т	$H_{сл}/D_{сл}$	Конусность, %	Параметры конуса осаждения			
					Высота мм/%	Диаметр мм/%	Площадь %	Объем %
Обычный бесприбыльный	38Х2Н2МА	$\frac{1,4}{0,039}$	1,99	6,1	$\frac{256}{20}$	$\frac{249}{57,9}$	9,2	2,75
Уширенный к низу бесприбыльный		$\frac{1,4}{0,087}$	1,99	-6,1	$\frac{292}{23}$	$\frac{330}{77}$	11,5	5,7
Слиток с холодильником		$\frac{1,53}{0,035}$	1,99	6,1	$\frac{210}{16,4}$	$\frac{234}{54,4}$	5,7	2,2
Сдвоенный слиток		$\frac{2,99}{0,085}$	3,98	$\pm 6,1$	$\frac{530}{22,5}$	$\frac{256}{59,5}$	9,2	3,08
Сдвоенный бесприбыльный		$\frac{2,6}{0,039}$	3,98	$\pm 6,1$	$\frac{327}{14,5}$	$\frac{247}{57,4}$	7,1	1,83
Ступенчатый слиток	Ст 25	$\frac{4,07}{0,036}$	4,59	$\frac{6,1}{-5,7}$	$\frac{230}{8,6}$	$\frac{276}{64,1}$	3,8	0,9
Обычный слиток	Ст 20	$\frac{6,57}{0,148}$	2,94	3,7	$\frac{570}{23,6}$	$\frac{325}{59}$	12,4	2,7
Уширенный к низу бесприбыльный	СТ 20	$\frac{5,9}{0,233}$	2,61	-3,7	$\frac{470}{20,3}$	$\frac{484}{70,4}$	15,8	5,1
Обычный слиток	38ХН3МФА	$\frac{24,2}{1,402}$	2,05	4,0	$\frac{640}{22,3}$	$\frac{889}{81,5}$	12,7	5,55
Слиток с вогнутой донной частью		$\frac{22,5}{1,521}$	2,05	4,01	$\frac{635}{22,1}$	$\frac{882}{83,2}$	14,6	5,97
Инокулированный слиток		$\frac{24,2}{1,716}$	2,05	4,01	$\frac{800}{28}$	$\frac{894}{74,5}$	16,8	7,57
Слиток с доливкой прибыли		$\frac{23,52}{2,744}$	2,05	4,01	$\frac{1000}{35}$	$\frac{882}{84}$	19,5	10,8



**Рисунок 1 Структурные зоны слитков различной массы, геометрии и способов разливки**

Изменение кристаллического строения нижней части слитков свидетельствует о влиянии ряда факторов отношения высоты к диаметру ( $H/D$ ), массы и конусности слитка, наличия утепляющей прибыльной надставки или надставки-холодильника, способа разливки и т.д. – на процесс затвердевания металла. Выявленная зависимость дает возможность предположить, что формирование конуса осаждения обусловлено процессами объемного зарождения и роста кристаллов вдоль фронта затвердевания и не определяется теплоаккумулирующей способностью массивного поддона.

Величина конуса осаждения в крупных слитках, отлитых с инокулированием струи и доливкой прибыли, достигает 800 и 1000 мм соответственно, по сравнению с обычным слитком – 630 мм (рис 1 б, табл 1). Образование протяженной мелкокристаллической области обусловлено ростом числа затравок от инокуляторов, зеркала металла и обломков ранее закристаллизовавшихся дендритов и подтверждает тот факт, что изолированные кристаллы, зарождающиеся в объеме расплава перед фронтом кристаллизации и внесенные струей металла, жизнеспособны и могут продолжать развиваться, оседая на нижние горизонты слитка.

Установлено, что в нижней части стального слитка, независимо от массы, геометрии и способов разливки, ликвация принимает отрицательное значение. Зона отрицательной ликвации распространяется на высоту  $1/3$  от высоты тела слитка и выше этой области переходит в положительную (рис 2).

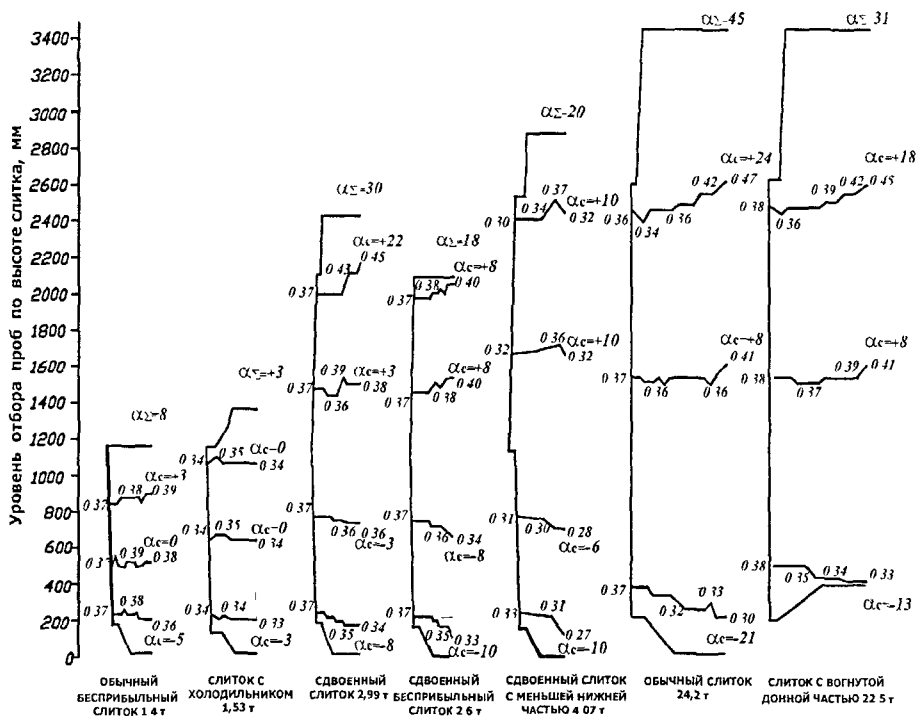


Рисунок 2 Распределение углерода по высоте и сечению слитков разной массы, геометрии и способов разливки

С увеличением массы слитка усиливается развитие ликвационных процессов, поэтому подробное изучение химической неоднородности в области конуса проводили на крупных кузнечных слитках стали марки 38ХНЗМФА обычной геометрии и с вогнутой донной частью, отлитых по традиционной технологии, а также слитка с инокуляцией струи и доливкой прибыли. Сравнение границ структурных зон исследуемых слитков с распределением ликватов выявило, что зона отрицательной ликвации соответствует области конуса осаднения.

Анализ химической неоднородности показал общую закономерность в распределении легкоплавких элементов в области конуса осаднения. В нижних горизонтах конуса степень ликвации С, S, Р достигает максимально отрицательных значений. При переходе к вершине конуса степень химической неоднородности снижается и для ряда слитков степень ликвации принимает положительное значение (рис. 3, табл. 2).

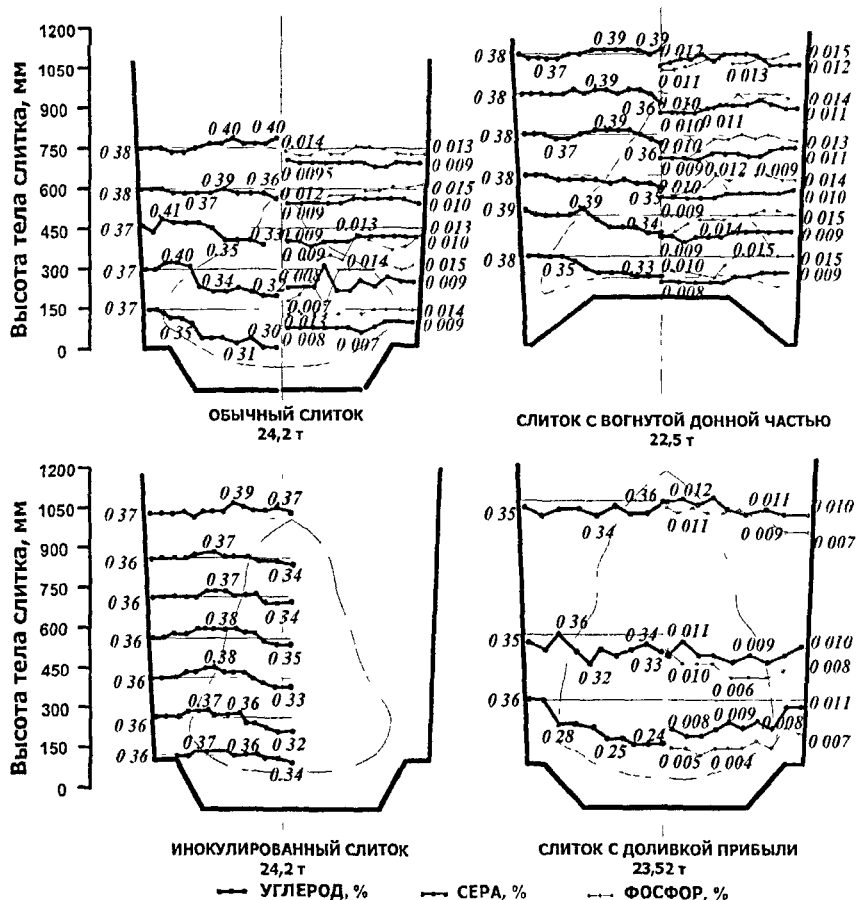


Рисунок 3 Распределение углерода, серы и фосфора по высоте и сечению конуса осаднения в крупных кузнечных слитках спокойной стали марки 38ХНЗМФА

Химическая неоднородность нижней трети стального слитка обусловлена особенностями кристаллизации конуса осаднения. Первые оседающие кристаллы образуются из расплава при высоких температурах, они характеризуются пониженным содержанием примесей (C, S, P), из-за чего нижняя часть конуса осаднения имеет пониженное содержание всех ликвирующих элементов.

Постепенно по мере нарастания твердого остова слитка теплоотвод замедляется и скорость роста кристаллов от поверхности снижается. Усиливаются ликвационные процессы, что приводит к росту содержания C, S, P у вершины конуса осаднения и его наружных объемов.

**Таблица 2** Изменение степени ликвации углерода серы, фосфора по высоте конуса осаднения в крупных слитках спокойной стали марки 38ХНЗМФА

Тип слитка	Высота тела слитка, мм	Степень ликвации элемента, %		
		C	S	P
Обычный слиток 24,2 т	750	+5	-5	0
	600	-5	-10	-15
	450	-13	-10	-35
	300	-16	-20	-50
	150	-21	-20	-7
Слиток с вогнутой донной частью 22,5 т	1100	+3	-20	-26
	800	-5	-33	-33
	650	-8	-33	-33
	500	-11	-40	-40
	350	-13	-46	-33
Инокулированный слиток 24,2 т	900	+3		
	750	-5		
	450	-3		
	300	-8		
	150	-11		
	0	-5		
Слиток с доливкой прибыли 23,53 т	980	-5	-8	0
	490	-11	-31	-9
	250	-35	-38	-54

Детальное исследование кристаллического строения донной части крупных кузнечных слитков выявило новую, ранее мало изученную переходную зону, которая занимает промежуточное положение между зоной столбчатых кристаллов, растущих от поддона, и зоной мелких глобулярных кристаллов конуса осаднения. Размер кристаллов переходной зоны в 3 раза больше кристаллов, формирующих зону конуса осаднения (рис 4а, табл 3). Угол наклона относительно горизонтали в среднем больше 45°, и такая ориентировка кристаллов прослеживается до мелкокристаллической области конуса осаднения.

Развитое строение дендритной структуры переходной зоны указывает на последовательный механизм ее кристаллизации. Рост столбчатых кристаллов прекращается в результате теплового сопротивления затвердевшего остова слитка и образующегося воздушного зазора. Снижение интенсивности направленного теплоотвода приводит к формированию равноосных кристаллов переходной зоны, развитие которой останавливают мелкие кристаллы конуса осаднения.

Результаты исследования, представленные на рис 4б, показали, что область последовательной кристаллизации в донной части стального слитка и у основания изложницы, несмотря на высокую теплоаккумулирующую способность массивного поддона, имеет меньшую протяженность, по сравнению со стенками изложницы на

вышележащих горизонтах. Выявленная особенность кристаллического строения подтверждает вероятность торможения роста столбчатых кристаллов оседающими изолированными кристаллами.

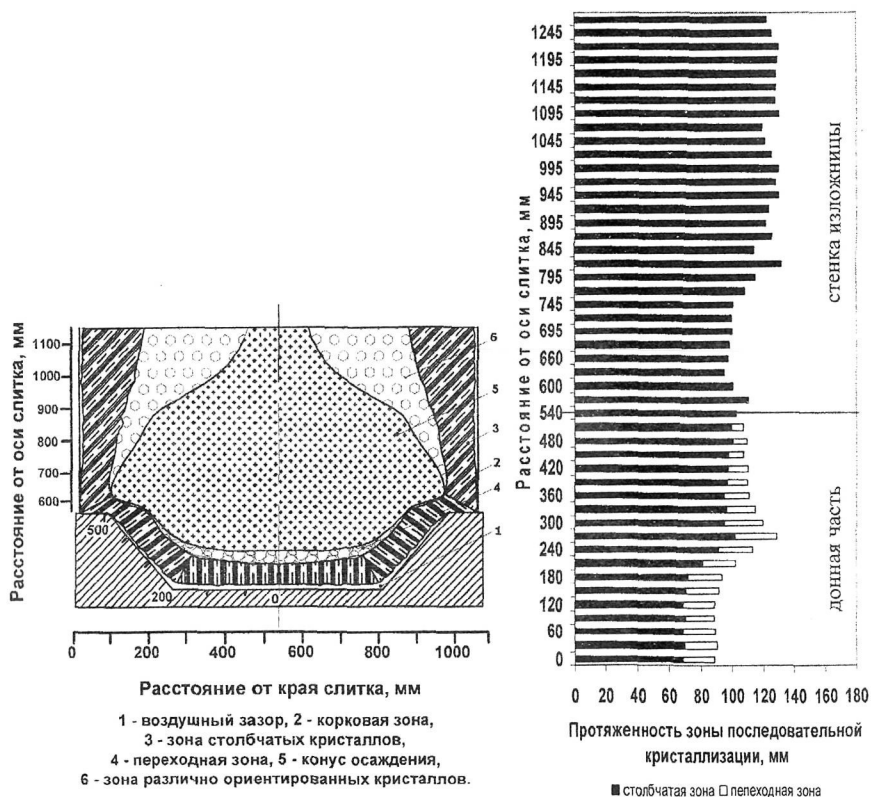


Рисунок 4. Схема строения (а) и протяженности зоны последовательной кристаллизации (б) нижней половины слитка

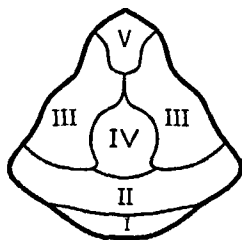
Таблица 3. Параметры кристаллической структуры донной части слитков

Структурная зона	Обычный слиток	Слиток с вогнутой донной частью	Инокулированный слиток	Слиток с доливкой прибыли
переходная зона	$\frac{2,7-5,5}{3,2}$	$\frac{2,1-6}{3,1}$	$\frac{2,4-5}{3,5}$	$\frac{2,5-5,2}{3,3}$
конуса оседания	$\frac{1-1,9}{1,6}$	$\frac{1,2-2,2}{1,7}$	$\frac{1,1-1,9}{1,5}$	$\frac{1-1,9}{1,6}$

Примечание: в числителе — интервал разброса значений, в знаменателе — среднее значение

Изучение макроструктуры конуса оседания показало, что он имеет зональное строение и включает пять основных зон с различной плотностью дендритной структуры и размером формирующих ее кристаллов (рис. 5, табл. 4). Изменение величин

ны кристалла в осевой зоне конуса осаждения, приведенное на рис 6, наглядно демонстрирует, что при переходе от зоны II к зоне IV кристаллы приобретают глобулярную форму. Так как центральная область замкнута наружными объемами, то в процессе затвердевания затрудненный теплоотвод от зоны IV приводит к прекращению роста кристаллов и изменению их дендритной формы на глобулярную. Наружные области и вершина конуса осаждения имеют ярко выраженное разветвленное строение.



Зона I — донная зона, Зона II — основание конуса,  
Зона III — наружная зона, Зона IV — центральная зона,  
Зона V — вершина конуса

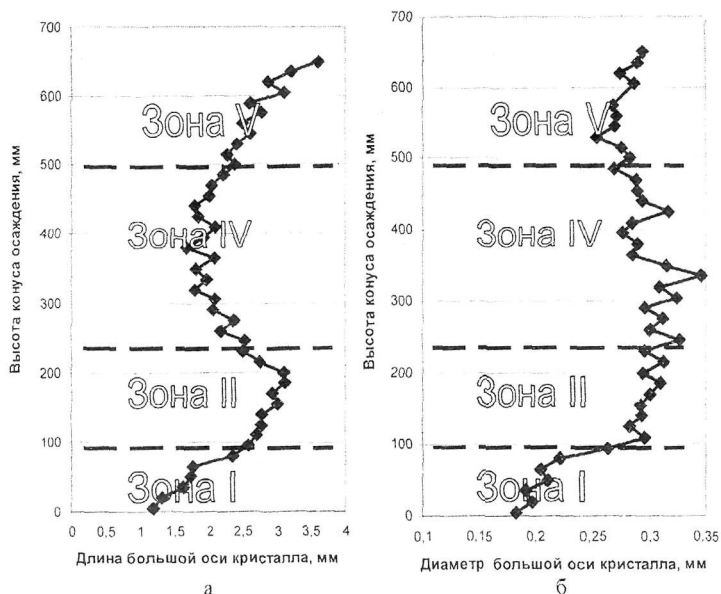
**Рисунок 5** Схема зонального строения конуса осаждения

**Таблица 4** Параметры кристаллической структуры конуса осаждения

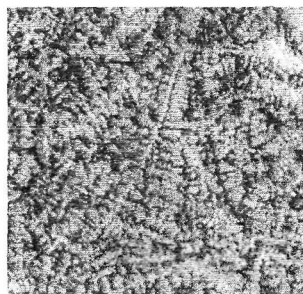
Тип слитка	Средняя длина кристалла, мм / Средняя объемная доля дендритных осей, %				
	зона I	зона II	зона III	зона IV	зона V
Обычный слиток	1,9 / 82,7	3,5 / 64,6	3,98 / 68,7	2,4 / 76,7	4,87 / 60,5
Слиток с вогнутой донной частью	—	1,66 / 66,4	2,4 / 58,3	1,44 / 78,2	3 / 61,3
Инокулированный слиток	1,4 / 82,5	1,6 / 81,7	1,8 / 81	1,3 / 82	1,9 / 77,6
Слиток с доливкой прибыли	1,6 / 83,4	2,1 / 77,9	2,7 / 72,4	1,9 / 81,1	3,5 / 68,1

Выявленная различная морфология дендритной структуры в конусе осаждения указывает на важную роль развивающихся теплофизических и гидродинамических процессов в период затвердевания жидкого металла в изложнице.

В ходе металлографического исследования кристаллического строения конуса осаждения были обнаружены крупные кристаллы, размер которых в 3-4 раза больше параметров основной массы дендритов (рис 7). Так, на фоне однородной структуры с размером кристаллов 2,7 – 4 мм наблюдались одиночные дендриты длиной до 9,6 - 14,2 мм. Они расположены хаотично в объеме конуса и не имеют направленной ориентировки. Параметры крупных кристаллов идентичны равноосным кристаллам бокового фронта кристаллизации вышележащих горизонтов слитка, которые под действием нисходящих конвективных потоков переносятся в донную часть и «сокристаллизуются» с мелкими кристаллами конуса осаждения.



**Рисунок 6. Изменение величины кристалла в осевой зоне конуса осаждения**



**Рисунок 7. Изогнутый кристалл в объеме конуса осаждения в слитке с доливкой прибыли**

Мелкокристаллическая область конуса осаждения влияет на строение окружающих ее объемов металла. Площадь, занимаемая зоной дугообразных трещин, ширина и угол раскрытия зависят от величины и формы конуса осаждения. Чем больше высота последнего, тем меньше площадь, занимаемая зоной дугообразных трещин и угол их раскрытия. Смещение дефектной зоны в вышележащие горизонты облегчает залечивание горячих трещин и приводит к меньшей их протяженности по длине и сечению стального слитка (рис. 8, табл. 5).

Образование дугообразных трещин происходит у вершины конуса осаждения. Характер расположения дефектной области свидетельствует о существовании двух различных механизмов кристаллизации — последовательного и объемного, развитие которых приводит к формированию неоднородной структуры.

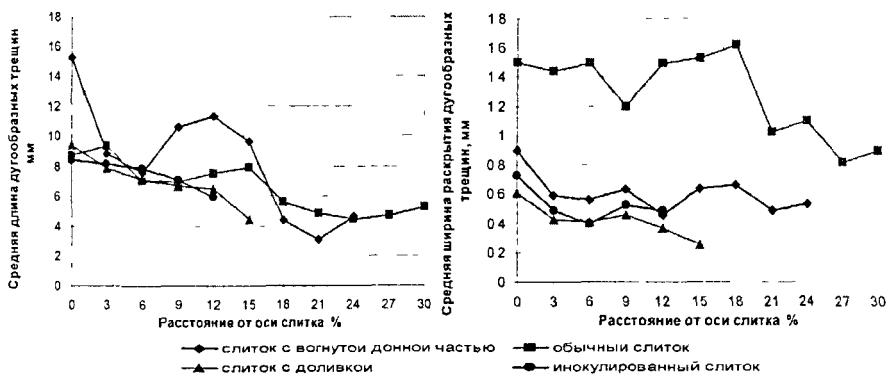
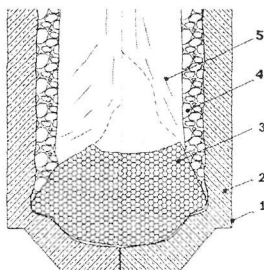


Рисунок 8 Зависимость величины дугообразных трещин от типа слитка

Развитие зоны внеосевой ликвации происходит на среднем горизонте слитка за пределами границ конуса осаждения. Расположение «усов» внеосевой ликвации изменяется параллельно образующим конуса, т.е. развивается на стыке вертикального и горизонтального фронтов затвердевания (рис 9, табл 6). Отсутствие «задержки кристаллизации» в области конуса, посредством которой происходит формирование шнуров внеосевой ликвации, подтверждает, что оседающие изолированные кристаллы подавляют развитие последовательной кристаллизации в нижней части слитка.

Таблица 5 Характеристика зоны дугообразных трещин

Тип слитка	% от площади тела слитка / % к диаметру слитка	Высота залегания дугообразных трещин, мм	Высота конуса осаждения относительно тела слитка, мм	Угол раскрытия дугообразных трещин	Размер кристалла в конусе осаждения, мм	Размер кристалла в зоне дугообразных трещин, мм
Обычный слиток	3,8 / 31,9	810	730	110	$\frac{2,7}{4,1} \frac{6,2}{4,1}$	$\frac{3,2}{6,15} \frac{10,1}{6,15}$
Слиток с вогнутой донной частью	2,26 / 21	1000	925	60	$\frac{1,2}{2,7} \frac{4,4}{2,7}$	$\frac{2,3}{4,4} \frac{7,3}{4,4}$
Инокулированный слиток	1,2 / 11,5	1060	970	180	$\frac{0,9}{1,4} \frac{3,9}{1,4}$	$\frac{1,5}{2,2} \frac{3,5}{2,2}$
Слиток с доливкой прибыли	1,9 / 19,6	1170	1100	88	$\frac{1,2}{2,7} \frac{5,6}{2,7}$	$\frac{2,1}{4,6} \frac{7,5}{4,6}$



1 – корковая зона, 2 – столбчатые кристаллы, 3 – конус осаждения,  
4 – равноосные кристаллы, 5 – шнуры внеосевой ликвации

**Рисунок 9. Схема расположения шнуров внеосевой ликвации**

**Таблица 6. Характеристика зоны внеосевой ликвации**

№	% от площади осевого темплета	Расстояние от оси, мм	Радиус конуса осаждения, мм	Ширина зоны, мм низ/середина слитка	Угол наклона	Максимальный диаметр шнура, мм
Обычный слиток	20,33	270	выше конуса	100/152	53	5,1
Слиток с вогнутой донной частью	26,6	377	300	85/212	76	3,9
Инокулированный слиток	18	388	370	64/100	71	2,5
Слиток с доливкой прибыли	12,5	308	113	68/85	80	3

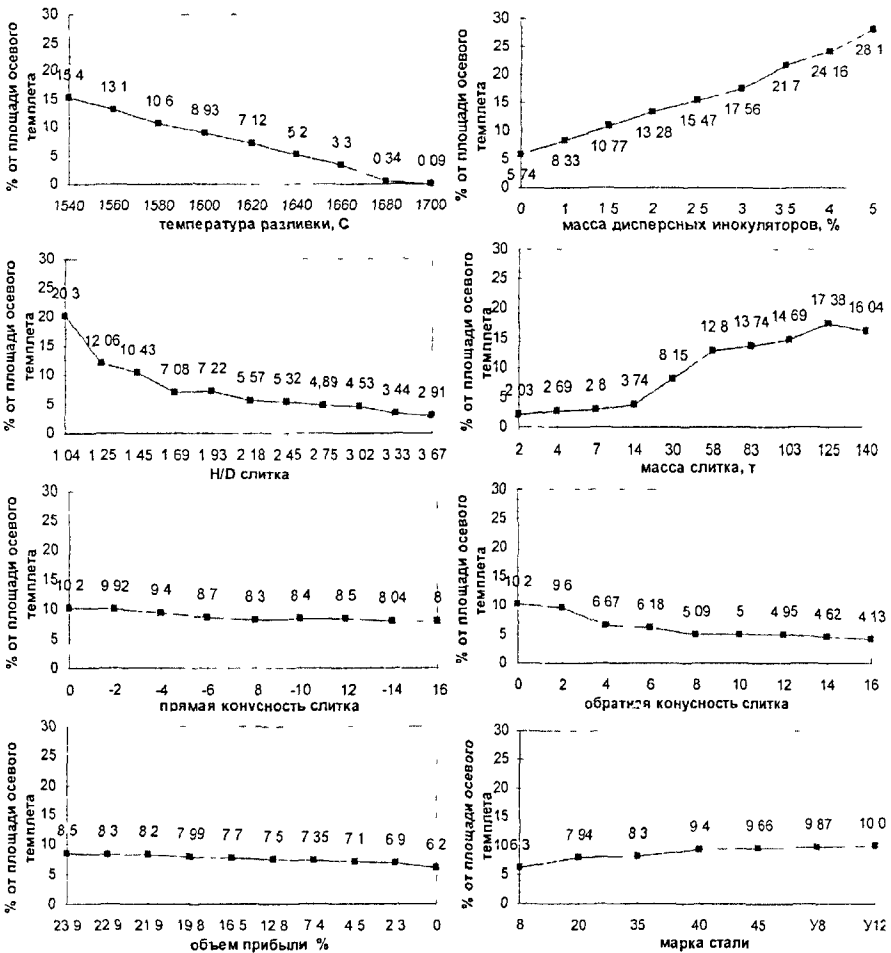
Таким образом, выявленные особенности кристаллического строения нижней трети стальных слитков свидетельствуют о возможности развития осадочной кристаллизации в период их затвердевания.

В четвертой главе исследовались закономерности формирования структуры центральной области слитка, которая включает в себя находящийся в донной части конус осаждения и располагающуюся над ним зону осевой рыхлости. С этой целью была проведена оценка влияния ряда факторов на процесс кристаллизации: начальной температуры разливки металла, доли дополнительно введенных центров кристаллизации, марки стали, отношения  $H/D$  слитка, конусности граней изложницы, относительного объема головной части, массы слитка.

Влияние геометрии и технологических параметров слитка на степень развития структурных зон и площади конуса осаждения отображено на рисунках 10 и 11.

Наибольшее воздействие на развитие конуса осаждения оказывает масса слитка (1...140т) и доля дополнительно вводимой зародышевой фазы (0...5%), с ростом этих параметров конус увеличивается в 6 и 8 раз, а с увеличением  $H/D$  слитка (1...4) и температуры разливки (1540...1700 °С) его относительная площадь уменьшается в 7 и 15 раз соответственно. Проведенный анализ факторов показал, что параметры,

активно влияющие на величину конуса осаждения, в той же степени влияют на получение плотной осевой зоны и подавляют развитие осевой неоднородности



**Рисунок 10** Зависимость площади конуса осаждения от различных факторов

Максимальная площадь конуса осаждения 28,11% достигается при дополнительном введении зародышевой фазы. Иными словами увеличение доли объемной кристаллизации в процессе затвердевания горячего расплава способствует получению более однородной структуры слитка.

Расчет кинетики горизонтального и вертикального продвижения твердой фазы показал, что образование конуса осаждения обуславливается развитием двухфазной жидко-твердой области, которая является источником оседающих кристаллов. Развитие двухфазной области сопровождается ростом конуса осаждения, после формирования которого скорость кристаллизации центральной части слитка резко возрастает (рис. 12).

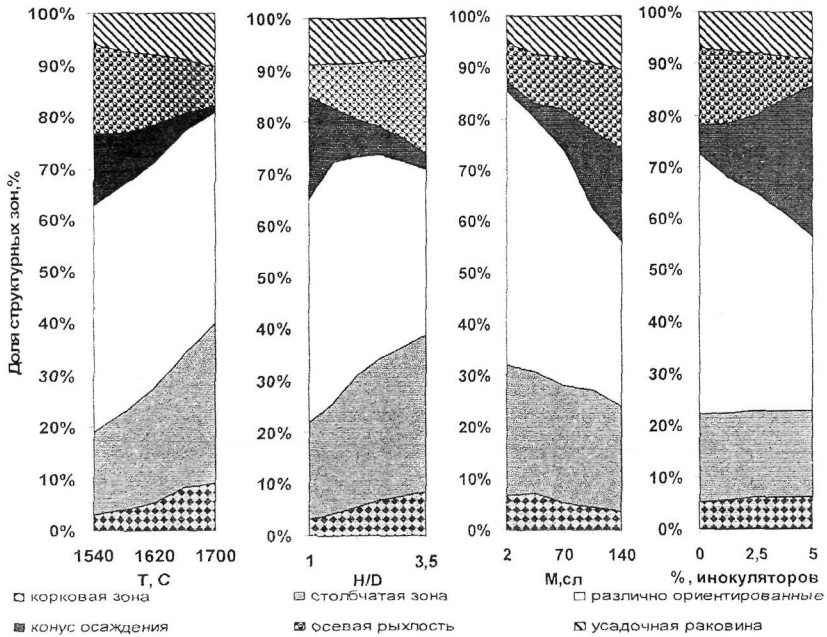


Рисунок 11. Влияние температуры расплава, отношения H/D слитка, массы слитка и количества зародышевой фазы на развитие структурных зон

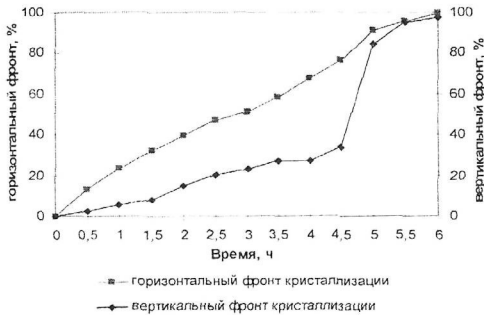


Рисунок 12. Кинетические кривые горизонтального и вертикального продвижения твердой фазы в слитке массой 24,2 т

Установленные зависимости дают возможность управлять процессом кристаллизации с целью получения оптимального расположения дефектных зон в слитке посредством регулирования геометрических параметров и технологических факторов разливки для каждой конкретной заготовки. Такой подход позволяет достичь определенной экономии металла и делает технологиюковки стальных слитков более эффективной и целенаправленной.

**В пятой главе** приведены результаты исследования дефектов, обнаруженных методом ультразвуковой дефектоскопии, с нижней части поковки (рис. 13). Размеры дефектов превышали максимально допустимые нормы, в результате чего готовое изделие браковали.

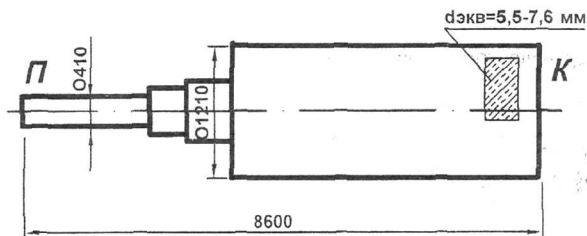


Рисунок 13 – Схема расположения дефектов в поковке

Металлографическим исследованием металла, вырезанного по месту расположения дефекта, были выявлены светлые пятна. По границе дефектного участка залегали грубые неметаллические включения от 40 до 3000 мкм, скопления которых приводили к расслоению металла, выявляющимися на поперечном темплате в виде трещин.



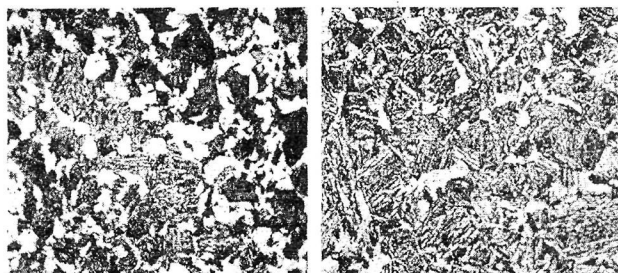
Рисунок 14. Макроструктура по месту дефекта, обнаруженного методом УЗК

В осветленном участке понижено содержание легкоплавких примесей (углерода, серы и фосфора) по сравнению с основным металлом. Исследование нетравленных образцов показало, что тип сульфидной фазы в дефектной области отличался от здорового металла. В осветленном участке присутствовали одиночные сульфиды  $\text{FeS} - \text{MnS}$  округлой формы. В основном металле пластичные сульфидные включения располагались небольшими группами, вытянутыми в строчки вдоль направления деформации. Анализ микроструктуры показал наличие в дефектной зоне квазизвтектоида на фоне равновесной феррито-перлитной структуры здорового металла (рис. 15). Причиной образования квазизвтектоида и сульфидов типа I является быстрое переохлаждение небольших объемов расплава.

Петрографическим методом анализа идентифицировали, что в состав крупных гетерогенных включений входит: магнезиальная шпинель  $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ , фаялит  $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$  с выделившейся избыточной закисью железа  $\text{FeO}$  и тефроит  $2\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ . Типичная многофазность и размер включений указывают на их экзогенное происхождение. Состав включений идентичен высокоглиноземистому огнеупору, используемому для футеровки направляющих труб и разливочных стаканов.

Таким образом, проведенное исследование выявило, что осветленные участки в теле поковки являются нерасплавившимися следами металлических настывей, образующихся на нижнем торце огнеупорных стаканов и направляющих труб (рис. 16). Металлические «сосульки» попадают в расплав в период разливки метал-

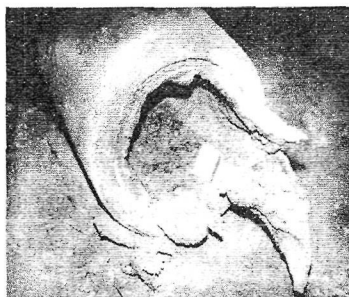
ла и оседают в донную часть слитка совместно с нисходящими потоками изолированных кристаллов.



а – основного металла с частицей оплавившегося дефекта;  
б – дефектная область

**Рисунок 15. Микроструктура стали 38ХНЗМФА  $\times 500$**

В условиях производства увеличение отходов донной обрезки от 3% до 8,6%, предназначенное для ассимиляции такого рода дефектов, недостаточно, и изделия бракуют. Уменьшить отбраковку поковок по дефекту «светлая корочка» в теле заготовок возможно, устранив их образование.



**Рисунок 16. Металлическая настыль на торцевой части направляющей трубы**

Возникновение настелей на огнеупорной направляющей трубе связано с проникновением металла в поры огнеупора. В производственных условиях температура и скорость разливки варьируется в ограниченных пределах, поэтому наиболее легко регулируемым фактором является качество внутренней поверхности огнеупорных вставок. Понизить смачиваемость поверхности огнеупора возможно путем нанесения на вставку жаростойких покрытий. С учетом стоимости, дефицитности из большого числа термостойких покрытий наиболее приемлема алюмохромофасфатная связка (ТУ 6-18-166-78). Алюмохромофасфатное связующее (АХФС) представляет собой гомогенный концентрированный раствор оксидных соединений  $Al_2O_3$  и  $Cr_2O_3$  в 65%-ной ортофосфорной кислоте. Растворы на фосфатных связующих обладают высокой шлакоустойчивостью и огнеупорностью 1500-1700°C. Их использование обеспечивает получение высокоэффективных покрытий с низким водопоглощением и пористостью. Это позволяет снизить смачиваемость и повысить устойчивость против размывания внутренней поверхности стакана расплавом металла.

Результаты лабораторных исследований огнеупорных футеровок с покрытием АХФС представлены в таблице 7

**Таблица 7. Краевой угол смачивания и глубина проникновения стали в поры направляющей трубы**

Вид покрытия	Краевой угол смачивания, град	Глубина проникновения ме- талла в поры, мм
С покрытием АХФС	85	1,0
Без покрытия	63	3,0

Проведение опытно-промышленного опробования показало, что использование огнеупорного покрытия АХФС на внутренней поверхности направляющих труб и разливочных стаканов позволяет устранить настыеобразование в процессе отливки стальных слитков. Указанная технология была внедрена в производство. С использованием направляющих труб с огнеупорным покрытием АХФС отлито более 300 кузнечных слитков массой от 7 до 50 т. Брак по дефектам «светлая корочка» с 2004 по 2006 год снизился с 8 до 0,6%.

### ОБЩИЕ ВЫВООДЫ

1. Установлено, что зонное строение конуса осаждения характерно для всех изученных слитков независимо от массы, геометрии и технологических параметров разливки.
2. Зонное строение конуса осаждения, обуславливается различными условиями теплоотвода в период зарождения кристаллов и затвердевания нижней части слитка. Характер расположения структурных зон в конусе осаждения, а также наличие крупных кристаллов в его объеме подтверждают развитие осадочного механизма кристаллизации в период затвердевания стального слитка.
3. Переходная зона в донной части слитка, сформированная различными ориентированными кристаллами, размер которых в 3 раза больше кристаллов вышележащих горизонтов, свидетельствует о прекращении развития последовательной кристаллизации вследствие оседания изолированных дендритов, образующихся в двухфазной жидко-твердой области стального слитка.
4. Установлено, что область отрицательной ликвации совпадает с границами зоны конуса осаждения. Анализ химической неоднородности показал, что количество легкоплавких примесей в его поверхностных слоях по отношению к основанию возрастает в среднем на 17% по [C], на 12% по [S] и на 35 % по [P].
5. Степень развития объемной кристаллизации отражается на развитии зоны дугообразных трещин и расположении осей внецентральной ликвации. С увеличением размера конуса осаждения в 1,5 раза протяженность области дугообразных трещин уменьшается в 3 раза, а зона внеосевой ликвации смещается в вышележащие горизонты.
6. Показано, что на степень развития объемной кристаллизации наибольшее влияние оказывает температура разливки, отношение высоты к среднему диаметру ( $H/D$ ), масса слитка, количество зародышевой фазы. Ускоренное продвижение фронта затвердевания в вертикальном направлении уменьшает глубину распространения осевых дефектов, смещая их в вышележащие горизонты слитка, улучшает подпитку осевой зоны.

- 7 Изучение механизма формирования нижнего конуса позволило установить, что причиной образования дефектов поковки, является ошлакованная металлическая настывь, оседающая в донной части стального слитка
- 8 Внедрение разработанного технологического мероприятия позволило устранить брак по дефектам УЗК с нижней части поковки Экономический эффект от внедрения новой технологии составил 970 тыс руб

Основные положения диссертационного исследования опубликованы в следующих работах

- 1 Моделирование напряженного состояния стальных слитков при затвердевании / С И Жульев, Е И Бузинов, К Ю Бод, В А Шамрей, Ю А Посламовская // *Сталь* – 2006 – №7 – С 21 – 22
- 2 Посламовская, Ю А Особенности формирования нижней части крупных кузнечных слитков Cr-Ni-Mo сталей / Ю А Посламовская, С И Жульев // *Металлург* – 2008 – №4 – С – 67–70
- 3 Особенности формирования структурных зон в крупных стальных слитках / М Е Живов, А П Фоменко, К Ю Бод, В А Шамрей, Ю А Посламовская // *Высокие технологии в машиностроении матер Междунар науч – техн конф*, Самара, 20 – 22 окт 2005 г / Самар Гос Техн ун – т – Самара, 2005 – С 178–180
- 4 Причины возникновения внутренних трещин в крупных кузнечных слитках и разработка мероприятий по их устранению / Ю А Посламовская, К Ю Бод, М Е Живов, А П Фоменко // *Высокие технологии в машиностроении матер Междунар науч – техн конф*, Самара, 20 – 22 окт 2005 г / Самар Гос Техн ун – т – Самара, 2005 – С 216 – 218
- 5 Посламовская, Ю А Исследование влияния характера струи металла на качество стального слитка / Ю А Посламовская, С И Жульев // *Энергетики и металлургии настоящему и будущему России матер 6-й всерос конф студентов, аспирантов и специалистов, Магнитогорск*, 24 – 26 мая 2005 г / МГТУ – Магнитогорск, 2005 – С 19
- 6 Исследование структуры с помощью металлографической программы МГП / К Ю Бод, В А Шамрей, Ю А Посламовская, А В Мозговой, М Е Живов // *матер Междунар молодежной конференции «XIV Туполевские чтения»*, Казань, 10 – 11 ноябрь 2006 г / КГТУ им А Н Туполева – Казань, 2006 – С 140 – 141
- 7 Посламовская, Ю А Исследование структурных зон конуса осаждения крупных кузнечных слитков / Ю А Посламовская, В А Шамрей, А В Мозговой // *Наука Технологии Инновации матер всерос науч –тех конф молодых ученых, Новосибирск*, 7 – 10 декабрь 2006 г / НГТУ – Новосибирск, 2006 – С 216 – 218
- 8 Исследования технологии разливки стали на структурные параметры крупного кузнечного слитка / П С Рвачев, В А Шамрей, Ю А Посламовская, А В Мозговой // *VII ВНТК «современные промышленные технологии» матер всерос науч –тех конф*, Нижний Новгород, декабрь 2006 г / НИИЦ – Нижний Новгород, 2006 – С 6 – 7
- 9 Посламовская, Ю А Влияние геометрических параметров слитка на величину конуса осаждения / Ю А Посламовская, В А Шамрей, А В Мозговой // *Энергетики и металлургии настоящему и будущему России матер 6-й всерос конф студентов, аспирантов и специалистов, Магнитогорск*, 22 – 23 мая 2007 г / МГТУ – Магнитогорск, 2007 – С 81 – 84
- 10 Посламовская, Ю А Исследование причин образования трещин в крупных кузнечных слитках / Ю А Посламовская // *IX Региональная конференция молодых*

исследователей Волгоградской области, г. Волгоград, 9 – 12 ноября 2004 г. Тезисы докладов / ВолгГТУ и др. – Волгоград, 2004 – С. 130 – 131

- 11 Посламовская, Ю. А. Исследование кристаллической структуры конуса осаждения крупных кузнечных слитков // X Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области, г. Волгоград, 8 – 11 ноября 2005г. Тезисы докладов / ВолгГТУ и др. – Волгоград, 2005 – С. 140 – 141
- 12 Посламовская, Ю. А. Исследование механизма кристаллизации конуса осаждения крупных кузнечных слитков / Ю. А. Посламовская // XI Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области, г. Волгоград, 8 – 10 ноября 2006г. Тезисы докладов / ВолгГТУ и др. – Волгоград, 2006 – С. 152 – 153
- 13 Исследование природы дефектов в поковках из стали 42CrMo4V и 18NiCrMo5 / С. А. Пегишева, Г. П. Шевкун, Ю. А. Посламовская, Н. С. Масловская // Научные сообщения КДН бюл. / Волгогр. клуб докторов наук – Волгоград, 2004 – № 13 – С. 98 – 105
- 14 Посламовская, Ю. А. Снижение загрязненности стального слитка и поковки из конструкционной стали // Научные сообщения КДН бюл. / Волгогр. клуб докторов наук – Волгоград, 2005 – № 14 – С. 47 – 51
- 15 Посламовская, Ю. А. Устранение внутренних дефектов стальных поволоков / Ю. А. Посламовская, С. И. Жульев // Научные сообщения КДН бюл. / Волгогр. клуб докторов наук – Волгоград, 2005 – № 14 – С. 51 – 56
- 16 Посламовская, Ю. А. Исследование кристаллического строения нижней части слитков / Ю. А. Посламовская, К. Е. Титов, С. И. Жульев // Сб. Металлургия в машиностроении – Волгоград, 2006 – С. 105 – 108
- 17 Посламовская, Ю. А. Исследование переходной зоны конуса осаждения / Ю. А. Посламовская, С. И. Жульев // Сб. Металлургия в машиностроении – Волгоград, 2006 – С. 175 – 178
- 18 Посламовская, Ю. А. Разливочные металлические настывы в стальных слитках / Ю. А. Посламовская, С. И. Жульев // Сб. Металлургия в машиностроении – Волгоград, 2006 – С. 178 – 181
- 19 Гаманюк, С. Б. Исследование особенности формирования конуса осаждения крупных кузнечных слитков / С. Б. Гаманюк, Ю. А. Посламовская, С. И. Жульев // Сб. Металлургия в машиностроении – Волгоград, 2006 – С. 156 – 161
- 20 Горунев, А. И. Исследование крупных кристаллов в объеме конуса осаждения стального слитка / А. И. Горунев, Ю. А. Посламовская, С. И. Жульев // Сб. Металлургия в машиностроении – Волгоград, 2006 – С. 161 – 165

**Личный вклад автора в опубликованные работы.** Все выносимые на защиту научные и практические результаты получены автором лично и в соавторстве

В работах [2, 3, 6, 7, 11, 12, 16, 17, 19, 20] автором приводятся данные, полученные в результате исследования макроструктурной, химической неоднородности нижней половины крупных стальных слитков различной геометрии и технологии отливки. В статье [1] представлены результаты, полученные с помощью компьютерного моделирования, определяющие закономерности формирования центральной зоны в теле прибыльного сдвоенного ступенчатого слитка с меньшей нижней частью, а также влияние геометрических и технологических параметров на степень их развития. В работах [4, 10, 13, 14, 15, 18], автором проведено исследование дефектов крупных кузнечных слитков и изготавливаемых из них крупногабаритных поволоков, определены закономерности наследования дефектов слитка заготовкой. В работах [5, 8, 9], автором предложены оптимальные геометрические параметры слитков и технологические режимы отливки с целью получения качественных поволоков.

Подписано в печать 29.04.200 г. Заказ № 299 Тираж 100экз Печ л 1,0  
Формат 60 x 84 1/16 Бумага офсетная Печать офсетная

Типография «Политехник»  
Волгоградского государственного технического университета

400131, Волгоград, ул Советская,35