

*На правах рукописи*



004600872

**Колодкин Михаил Владимирович**

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ КУЗНЕЧНЫХ СЛИТКОВ  
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛЫХ ИЗДЕЛИЙ С УЛУЧШЕННЫМИ  
ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ**

Специальность 05.16.02

«Металлургия чёрных, цветных и редких металлов»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

**15 АПР 2010**

Москва – 2010

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping, stylized strokes.

Работа выполнена в ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»

Научные руководители:

доктор технических наук, профессор

Жульев Сергей Иванович,

доктор технических наук, профессор

Дуб Владимир Семёнович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

Жуков Александр Валентинович,

кандидат технических наук

Сафронов Александр Афанасьевич

Ведущая организация:

ОАО «Научно-исследовательский

институт металлургической

технологии»

Защита состоится « 22 » апреля 2010 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 217.042.01 при Открытом акционерном обществе «Научно-производственное объединение по технологии машиностроения (ЦНИИТМАШ)» по адресу 115088, Москва, ул.Шарикоподшипниковская, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке при ОАО НПО «ЦНИИТМАШ».

Автореферат разослан « 22 » марта 2010г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
Д 217.042.01., к.т.н.



Е.В.Макарычева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Развитие машиностроительного комплекса ставит задачу повышения качества металла кованных изделий и эффективности технологии их производства. В решение проблемы повышения качества стальных слитков для производства поковок внесли крупный вклад ряд учёных: В.А.Ефимов, Б.Б.Гуляев, Н.И.Хворин, Е.А.Казачков, С.Я.Скобло, Е.М.Китаев, В.С.Дуб, С.И.Жульев и др.

Качество кованой заготовки в значительной степени зависит от качества металла исходного кузнечного слитка, что в свою очередь определяется технологией выплавки и разливки стали, а также геометрическими параметрами слитка. Для повышения качества стали современные предприятия применяют внепечную обработку, модифицирование, разливку стали в вакууме, специальные меры воздействия на кристаллизующийся металл слитка. Разработке геометрических параметров слитков, учитывающих конечную форму кованого изделия уделяется недостаточное внимание, что снижает возможность повышения качества металла и эффективности производства поковок.

Наиболее распространённый тип кузнечного слитка, использующийся на предприятиях, производящих поковки различной конфигурации – прибыльный слиток нормальной длины ( $H/D=1,6-2,5$ ) с обратной конусностью, с утеплённой прибыльной надставкой и геометрическими параметрами, ориентированными на получение плотной осевой зоны. Выбор слитка производится из номенклатуры отливаемых на предприятии и определяется в основном массой изделия, средней величиной выхода годного и необходимой величиной улова металла.

Конструкция прибыльного слитка с параметрами, направленными на получение плотной осевой зоны не оптимальна для производства полых поковок. Это обусловлено тем, что часть металла прибыли слитка, восполняющего усадку металла в осевой зоне слитка при затвердевании, удаляется при последующей прошивке или высверливании осевой зоны заготовок. Кроме этого, прибыльная часть увеличивает массу слитка и время его затвердевания, повышая тем самым химическую неоднородность металла, что отрицательно сказывается на однородности распределения механических свойств металла изделий по длине и сечению.

Одним из наиболее оптимальных слитков для полых поковок в плане обеспечения качественных характеристик металла изделий и экономических показателей производства является слиток с захоложенной верхней частью. Для отливки подобного слитка вместо утеплённой прибыльной надставки используется массивная надставка меньшего объёма, изготовленная без футеровки (называемая надставкой-холодильником), назначение которой – обеспечить формирование в теле слитка при затвердевании относительно узкой усадочной раковины. В ходе последующей прошивки заготовки металл осевой части с усадочной раковиной удаляется. Слитки с захоложенной верхней частью характеризуются меньшей химической неоднородностью металла, по сравнению с металлом прибыльных слитков, что обеспечивает более равномерное распределение величин механических свойств металла изделий по их длине и сечению, а также более высоким выходом годного. В номенклатуре стальных заготовок, производимых предприятиями методом прессовойковки доля заготовок, имеющих сквозные или глубокие осевые отверстия значительна и может составлять до 80%. Поэтому задача по оптимизации параметров кузнечных слитков для полых поковок, направленная на повышение химической однородности металла слитков и увеличение выхода годного является актуальной задачей в металлургическом производстве.

**Цель работы:** исследование тепловой работы слитков массой от 2,07 до 17,2 тонны для выявления действенных факторов, позволяющих управлять расположением и формой усадочной раковины и кристаллической структурой с целью оптимизации технологии производства полых изделий.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- Выполнен сравнительный анализ кристаллического строения и химической неоднородности кузнечных прибыльных слитков обычной геометрии и слитков с захоложенной верхней частью;
- С помощью компьютерного моделирования затвердевания слитка исследовано влияние геометрических параметров слитка и технологических параметров разлива стали на развитие усадочной раковины в слитках с захоложенной верхней частью;
- Проведён сравнительный анализ расчётных результатов компьютерного моделирования развития усадочной раковины с экспериментальными, полученными путем исследования опытного слитка с захоложенной верхней частью;
- Разработан, опробован и внедрён в промышленное производство кузнечный слиток двенадцати развесов массой от 2,07 до 17,2 тонны с прямой конусностью с захоложенной верхней частью для производства полых изделий;
- Исследованы показатели механических свойств металла полых поковок, изготовленных из прибыльных слитков обычной геометрии и разработанных слитков с прямой конусностью с захоложенной верхней частью.

**Методы исследования.** Экспериментальная часть работы выполнена с применением методов оптической микроскопии и использованием компьютерных программ – определение параметров дендритной структуры металла и моделирование процесса кристаллизации слитка. Исследование химической неоднородности металла слитков производилось на фотоэлектрической установке ARL 3460 Metals Analyzer, спектральном анализаторе CS-200 и SPECTROLAB-M5.

#### Научная новизна:

1. С помощью компьютерного моделирования и экспериментального исследования процесса затвердевания опытно-промышленных слитков массой от 2,07 до 17,2 тонны рассмотрены факторы, определяющие размер, форму и расположение усадочной раковины и особенности кристаллического строения слитков в зависимости от геометрических и технологических параметров.

Установлено, что замена утепляющей прибыльной надставки массивной надставкой-холодильником:

- приводит к смещению теплового центра в центральную часть слитка;
- при использовании изложницы с отношением  $H/D = 1,6-1,8$  усадочная раковина имеет высоту 32–61 % и максимальную ширину 24,5 % от тела слитка, при объёме захоложенной верхней части слитка 7–8,4 %;
- приводит к увеличению относительной ширины зоны столбчатых кристаллов на 30–85%;
- изменение обратной конусности слитка с захоложенной верхней частью на прямую при прочих равных условиях уменьшает максимальный относительный диаметр усадочной раковины в теле слитка в среднем на 3 %.

2. Выявлено распределение ликвирующих элементов в слитке массой 2,07 т с прямой конусностью с захоложенной верхней частью:

- установлено отсутствие положительной ликвации серы и фосфора в верхней части тела слитка по всему сечению;
- выявлено, что ликвация углерода, серы и фосфора металла по сечению слитка меньше ликвации углерода, серы и фосфора металла традиционного

прибыльного слитка массой 1,7 т соответственно в 3,3, в 1,2 и в 1,7 раза.

3. Установлено, что использование слитков с прямой конусностью с захоложенной верхней частью для производства полых поковок, по сравнению с прибыльными слитками позволяет уменьшить дисперсию механических свойств металла по концам полых поковок в 1,1 – 1,4 раза, что обусловлено тем, что химическая неоднородность слитков с захоложенной верхней частью менее развита, чем прибыльных слитков.

**Практическая ценность.** Разработан и внедрён на ОАО «Буммаш» (г. Ижевск) слиток с прямой конусностью с захоложенной верхней частью двенадцати развесов массой от 2,07 т до 17,2 т для производства полых поковок, что позволило увеличить выход годного металла слитка в среднем на 7,2%. При этом, за счёт снижения химической неоднородности разработанного слитка достигнуто уменьшение дисперсии механических свойств металла по концам полых поковок в 1,1 – 1,4 раза.

Конструкция слитка спроектирована с учётом использования существующего на предприятии парка изложниц прибыльных слитков, что позволило минимизировать затраты на изготовление литейной оснастки. Замена футерованной прибыльной надставки надставкой-холодильником обеспечило экономию теплоизоляционных материалов и снижение трудоёмкости подготовки литейной оснастки. Уменьшение массы слитков позволило повысить пропускную способность разливочного пролёта за счёт сокращения времени затвердевания слитков и снизить расход газа на нагрев слитков перед ковкой.

Экономический эффект при изготовлении опытно-промышленной партии полых поковок из слитков с прямой конусностью с захоложенной верхней частью на ОАО «Буммаш» составил 1,867 млн.руб.

**Апробация работы** осуществлялась на VIII Конгрессе «Кузнец–2008» (Рязань 2008).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка литературных источников и приложений. Диссертация изложена на 121 странице машинописного текста, содержит 46 рисунков, 20 таблиц. Список использованных источников включает 120 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** приведены сведения об основных типах кузнечных слитков, применяемых для производства поковок. Описано влияние геометрии и технологических параметров отливки слитков на степень развития дефектов. Рассмотрены дефекты и процессы формирования физической, структурной и химической неоднородности металла слитка.

Для производства поковок применяются следующие основные типы кузнечных слитков: прибыльные, малоприбыльные и бесприбыльные. При этом по геометрическому параметру  $H/D$ , величина которого определяется как отношение высоты тела слитка к его среднему диаметру, слитки можно классифицировать на укороченные ( $H/D = 0,8-1,5$ ), нормальной длины ( $H/D = 1,6-2,5$ ) и удлинённые ( $H/D > 2,5$ ). Конусность слитка  $k_{ТС}$  считается прямой, если тело слитка уширено к низу, конусность обратная, если тело слитка уширено кверху. Величина конусности  $k_{ТС}$  (на обе стороны) определяется отношением разницы линейных размеров верхнего и нижнего диаметров тела слитка к его высоте, выраженным в процентах.

Кристаллизация стального слитка всегда сопряжена с формированием физической и химической неоднородности металла. Основными факторами, влияющими на степень их развития, являются химический состав, определяющий интервал затвердевания стали, геометрические параметры слитка, технология утепления прибыльной части слитка, температура и скорость разливки стали. Различают два типа химической неоднородности: дендритную и зональную. К дендритной относят: неоднородности в пределах дендрита (внутридендритная) и между соседними дендритами (междендритная). Зональная неоднородность – это скопление примесей углерода, серы, фосфора и других легирующих элементов в определенных зонах слитка. К ней относят области отрицательной, положительной и внецентренной ликвации. Химическая неоднородность слитков может наследоваться поковками, что снижает уровень и стабильность распределения механических свойств металла. К дефектам стального слитка, обусловленным явлением усадки, относятся усадочная раковина и осевые трещины. Последние подразделяются на вертикальные, V-образные и дугообразные.

Одной из существенных проблем для предприятий является тот факт, что из слитков производятся сплошные и полые поковки. Прибыльные кузнечные слитки укороченные и нормальной длины имеют геометрические параметры, направленные на получение плотной макроструктуры металла, что экономически не эффективно для производства полых поковок вследствие повышенной кузнечной обрести. Кроме этого, мероприятия направленные на уменьшение усадочных дефектов (например снижение H/D) способствуют развитию ликвационной неоднородности.

Прибыльные удлиненные слитки, по сравнению с прибыльными укороченными и нормальной длины по своим технико-экономическим показателям более эффективны для производства полых поковок вследствие меньшего объема прибыльной части и менее развитой химической неоднородности. Но при этом, удлиненные кузнечные слитки имеют развитую осевую рыхлость и не применяются для производства сплошных поковок ответственного назначения.

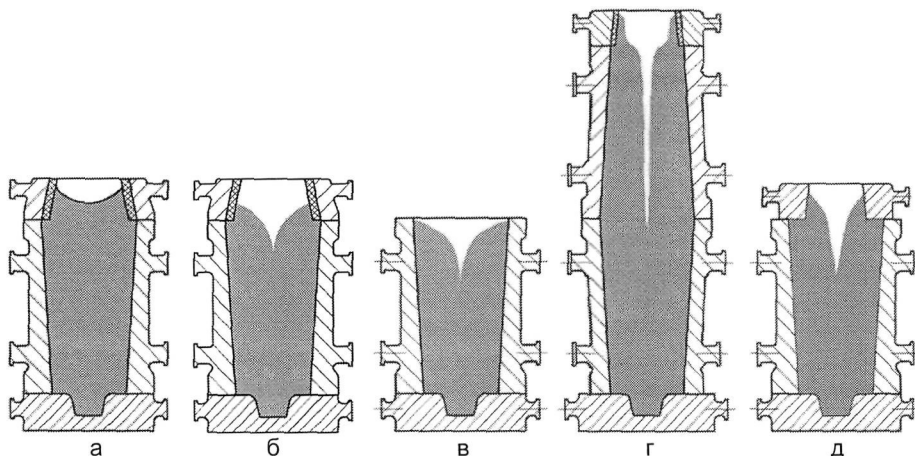
Применение малоприбыльных и неприбыльных слитков не позволяет существенно повысить выход годного металла и уменьшить ликвационную неоднородность по сравнению с прибыльными слитками.

Проблема выбора литейной оснастки для отливки оптимального с точки зрения качества и экономики слитка тем острее, чем больший диапазон развесов слитков производится на предприятии. Решать эту проблему только с помощью изготовления специализированных парков изложниц для слитков, из которых изготавливаются сплошные или полые поковки не вполне эффективно. Вышеперечисленные проблемы явились одной из предпосылок для разработки новых конструкций слитков для полых поковок – слитки с захоложенной верхней частью и двухконусные удлиненные слитки.

На рисунке 1 показано продольное осевое сечение собранной литейной оснастки и слитков различных типов.

Слиток с захоложенной верхней частью (рис.1, д) является одним из наиболее оптимальных слитков для производства полых поковок в плане обеспечения качественных характеристик металла изделий и экономических показателей производства. Затвердевание металла слитка с захоложенной верхней частью происходит быстрее, чем затвердевание прибыльного слитка вследствие замены утешляющей надставки надставкой-холодильником, что снижает химическую неоднородность металла. Объем захоложенной верхней части меньше объема прибыльной части, удаляемых при ковке в отход, что позволяет увеличить выход годного металла слитка. Положительной чертой технологии является возможность использовать один парк изложниц для отливки

слитков с сосредоточенной вдоль оси усадочной раковины для производства полых поковок, так и слитков для сплошных поковок при использовании утепленной прибыльной надставки.



а – прибыльный слиток; б – малоприбыльный слиток; в – бесприбыльный слиток; г – удлинённый двухконусный слиток; д – слиток с захоложенной верхней частью.

**Рисунок 1. Продольное осевое сечение собранной литейной оснастки и слитков различных типов.**

**Во второй главе** приведены сведения о материале исследований – слитке с захоложенной верхней частью и двух прибыльных слитков. Рассмотрена методика исследования химической и структурной неоднородности металла слитков. Описан программный комплекс Crystal, с помощью которого проектировался слиток с захоложенной верхней частью с заданными параметрами усадочной раковины. Изложены материалы по методике исследования влияния геометрических и технологических параметров на размеры усадочной раковины в слитках с захоложенной верхней частью. Приведена методика исследования металла поковок, откованных из прибыльных слитков и слитков с захоложенной верхней частью, на основании которой была выполнена сравнительная оценка равномерности распределения механических свойств по концам поковок.

**В третьей и четвертой главах** приведены результаты исследования макроструктуры и химической неоднородности металла прибыльного слитка нормальной длины и слитка с захоложенной верхней частью.

Исследование кристаллического строения прибыльного слитка производилось на слитке массой 4,5 т стали 35. Химическую неоднородность металла прибыльного слитка оценивали с помощью проб, отобранных от слитка массой 1,7 т стали 38ХНЗМФ.

Исследование кристаллического строения и химической неоднородности металла слитка с захоложенной верхней частью производилось на слитке с прямой конусностью массой 2,07 т стали 5ХНМФ, отлитого в изложницу с надставкой-холодильником.

Химический состав металла прибыльных слитков и с захоложенной верхней частью приведён в таблице 1. Геометрические параметры слитков и технологические параметры их отливки приведены в таблице 2.

Таблица 1. Химический состав ковшевых проб опытных слитков

Тип слитка	Масса слитка, т	C, %	Mn, %	Si, %	S, %	P, %	Cr, %	Ni, %	Mo, %	V, %
Прибыльный	1,7	0,37	0,36	0,30	0,016	0,011	1,41	3,17	0,42	0,13
Прибыльный	4,5	0,41	0,52	0,39	0,015	0,017	0,11	0,15	-	-
С заложенной верхней частью*	2,07	0,53	0,73	0,35	0,005	0,019	1,06	1,52	0,48	0,09

\*слиток с прямой конусностью

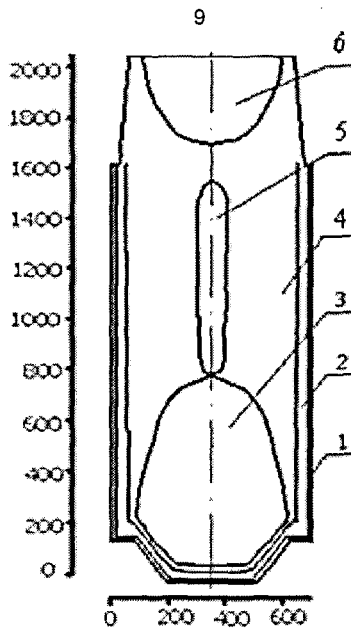
Таблица 2. Геометрические и технологические параметры слитков

Тип слитка	$m_{сл}$ , т	H/D	$K_{тс}$ , %	$V_{пр}$ , %	$T_{разл}$ , °C	$\tau_{тела}$ , МИН	$\tau_{пр}$ , МИН
Прибыльный	1,7	1,99	1,5	18,3	1570	1,65	1,25
Прибыльный	4,5	2,16	1,5	16,7	1570	2,70	1,30
С заложенной верхней частью	2,07	1,8	10	8,4	1562	2,17	0,43

\*значения конусности на обе стороны

Исследование прибыльного слитка массой 4,5 т выявило структурную неоднородность, типичную для прибыльных слитков спокойной стали, выражающуюся в наличие корковой зоны, зоны столбчатых кристаллов, зоны крупных различно ориентированных кристаллов, конуса осаждения, зоны осевой рыхлости и усадочной раковины, рис.2. Результаты исследования ликвационной неоднородности по углероду, сере и фосфору прибыльного слитка массой 1,7 т показали, что в нижней части слитка наблюдается зона отрицательная ликвации, степень ликвации элементов в которой составила (-8,1% [C], -6,3% [S], -9,1% [P]). При переходе к верхним горизонтам слитка степень химической неоднородности принимает положительный характер. В подприбыльной области степень ликвации элементов составила (+10,8% [C], +18,8% [S], +18% [P]), рис.3.

В структуре слитка массой 2,07 т с заложенной верхней частью (рис.4) обращает на себя внимание широко развитая зона столбчатых кристаллов, по сравнению с прибыльным слитком, средняя относительная ширина которой составляет 44%, при 16 % у прибыльного слитка массой 4,5 т. Наличие широко развитой зоны столбчатых кристаллов свидетельствует о том, что в слитке с заложенной верхней частью доля металла, затвердевающего в условиях интенсивного теплоотвода, что способствует снижению протекания ликвационных процессов больше, чем в прибыльном слитке нормальной геометрии.



1 – корковая зона; 2 – зона столбчатых кристаллов; 3 – зона конуса осаждения; 4 – зона различно ориентированных дендритов; 5 – зона осевой рыхлости; 6 – усадочная раковина.

Рисунок 2. Структурные зоны прибыльного слитка массой 4,5 т

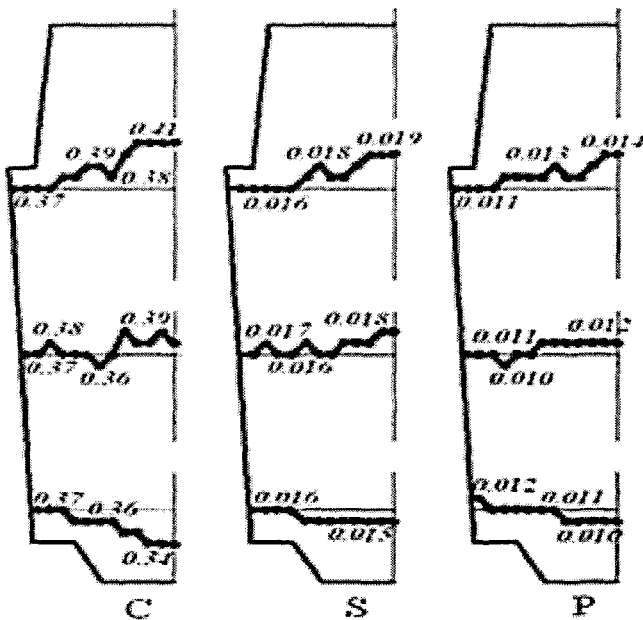
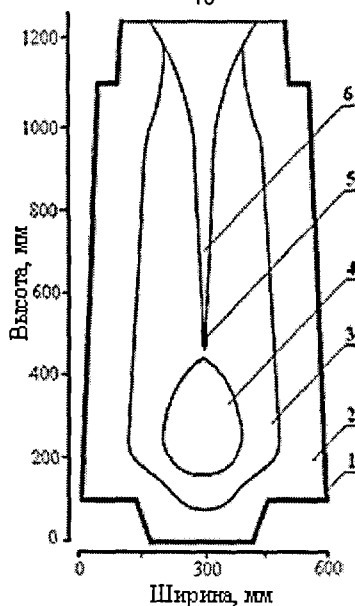


Рисунок 3. Распределение химических элементов по сечению прибыльного слитка стали 38ХНЗМФА массой 1,7 т



1 – корковая зона; 2 – зона столбчатых кристаллов; 3 – зона различно ориентированных дендритов; 4 – конус осаждения; 5 – зона осевой рыхлости; 6 – усадочная раковина.

Рисунок 4. Структурные зоны слитка стали 5ХНМФ массой 2,07 т с прямой конусностью с заоложенной верхней частью

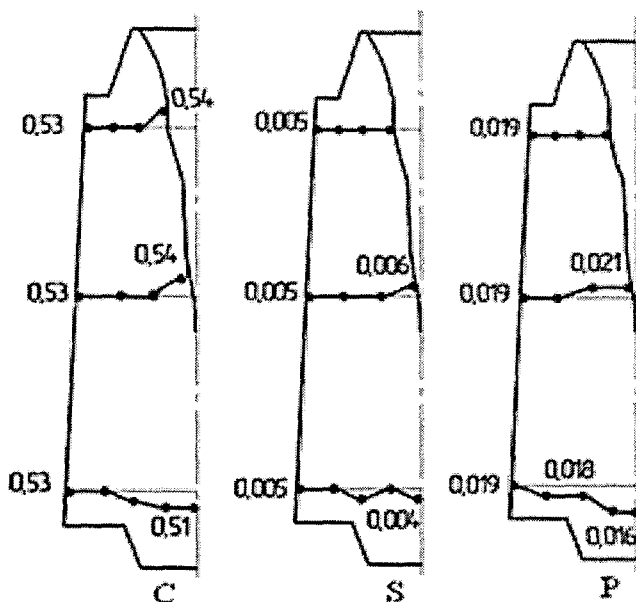


Рисунок 5. Распределение химических элементов по сечению слитка стали 5ХНМФ массой 2,07 т с прямой конусностью с заоложенной верхней частью

Таблица 3. Степени ликвации элементов металла слитков

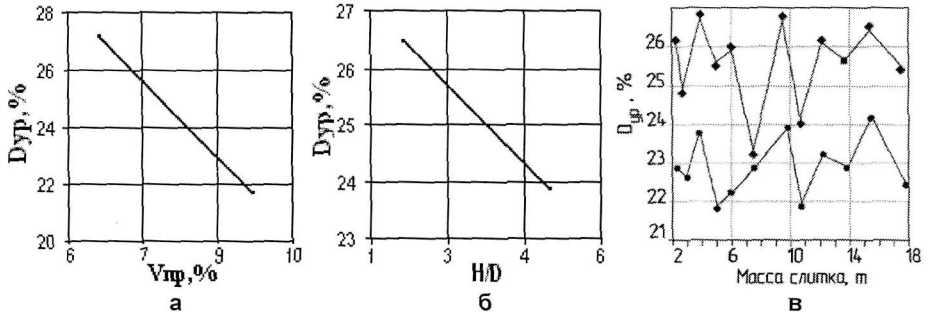
Параметр	Прибыльный слиток массой 1,7 т	Слиток с захоложенной верхней частью массой 2,07 т
Положительная ликвация (%):		
– углерода	+10,8	+1,9
– серы	+18,8	0
– фосфора	+18,0	0
Отрицательная ликвация (%):		
– углерода	-8,1	-3,8
– серы	-6,3	-20
– фосфора	-9,1	-15,8
Суммарная ликвация (%):		
– углерода	18,9	5,7
– серы	25,1	20
– фосфора	27,1	15,8

Результаты расчёта степени ликвационной неоднородности по углероду, сере и фосфору слитка с захоложенной верхней частью массой 2,07 т выявили, рис.5: в нижней части слитка наблюдается зона отрицательной ликвации, степень ликвации в которой составила (- 3,8 % [C], - 20 % [S], - 15,8 % [P]). На верхнем горизонте слитка степень ликвации составила (+1,9 % [C], 0% [S], 0% [P]).

Суммарная ликвация углерода, серы и фосфора металла слитка с захоложенной верхней частью массой 2,07 т меньше суммарной ликвации углерода, серы и фосфора металла прибыльного слитка массой 1,7 т соответственно в 3,3, в 1,2 и в 1,7 раза, таблица 3. Эти факты позволяют говорить о том, что слитки с захоложенной верхней частью химически более однородны, чем прибыльные слитки нормальной геометрии.

В пятой главе рассмотрены результаты исследования влияния геометрических и технологических параметров на развитие усадочной раковины в слитках с захоложенной верхней частью, что было учтено при проектировании промышленных слитков. Приведены параметры, которые задавались при разработке слитков с захоложенной верхней частью, показаны результаты проектирования промышленных слитков в соответствии с поставленными целями. Выполнено сравнение расчётных и экспериментальных параметров усадочной раковины, полученных с помощью компьютерного моделирования затвердевания металла слитка и исследования опытного слитка с захоложенной верхней частью. Показаны результаты отливки промышленной партии разработанных слитков и исследования качества металла поковок, изготовленных из разработанных слитков.

Исследовалось влияние на размер усадочной раковины относительного объёма захоложенной верхней части  $V_{пр}$ , конусности изложницы на обе стороны  $K_{изл}$ , параметра  $H/D$  тела слитка, соотношения диаметров надставки и изложницы в месте их сочленения  $d/D$ , величины перегрева расплава над температурой ликвидус  $\Delta T$ , отношения массы металла головной части слитка к массе надставки-холодильника  $m/M$ ; массы слитка  $M_{сл}$ ; прямой и обратной конусности изложницы.



■ – слиток с обратной конусностью; ● – слиток с прямой конусностью

Рисунок 6. Влияние геометрических и технологических параметров на развитие усадочной раковины в слитках с захоложенной верхней частью

Установлено, что наибольшее влияние на относительный диаметр усадочной раковины в теле слитка оказывают величина объема захоложенной верхней части  $V_{пр}$  и параметр  $H/D$ , рис.6 (а,б).

Эффективным способом воздействия на диаметр усадочной раковины в теле слитка является замена обратной конусности стенок изложницы на прямую путём установки изложницы большим сечением в низ (рис.6,в). Компьютерным моделированием затвердевания металла слитков установлено, что при отливке слитков с обратной и прямой конусностью одинаковой массы, в литейную оснастку с равными геометрическими параметрами, диаметр усадочной раковины в слитках уширенных к низу (с прямой конусностью) меньше, чем в слитках уширенных к верху (с обратной конусностью). Средняя величина максимального относительного диаметра усадочной раковины  $D_{yp}\%$  в слитках с прямой конусностью составила 23 %, в слитках с обратной конусностью той же массы – 26 %. Этот технологический приём, позволяющий получить в слитке более узкую усадочную раковину, при одинаковых параметрах литейной оснастки, был использован при разработке промышленных слитков с захоложенной верхней частью.

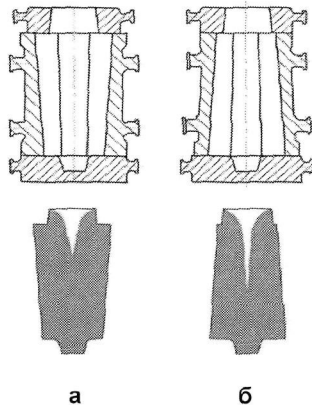


Рисунок 7. Схема сборки оснастки и результаты моделирования расположения усадочной раковины в слитках с захоложенной верхней частью с обратной (а) и прямой (б) конусностью

Слитки с захоложенной верхней частью были спроектированы для существующего на предприятии парка изложниц с целью минимизации дорогостоящей литейной оснастки. Изложницы имеют параметр  $H/D = 1,6 - 1,8$ , конусность на обе стороны = 10 %, всего парк изложниц включает двенадцать типоразмеров и предназначен для отливки слитков массой от 2,2 до 19,0 тонн верховым способом.

Параметры надставки-холодильника должны обеспечить формирование в теле слитка усадочной раковины с диаметром, при котором металл осевой зоны с усадочными дефектами будет гарантировано удалён в отходы при последующей прошивке заготовок в процессековки или высверления. Показано, что максимально допустимый диаметр усадочной раковины в теле слитка может рассчитываться из следующего выражения:

$$D_{\text{ур}} = \frac{D_{\text{отв}}}{k} \quad (1)$$

где  $D_{\text{ур}}$  – максимальный относительный диаметр усадочной раковины в теле слитка, %;

$D_{\text{отв}}$  – относительный диаметр отверстия в поковке, %;

$k$  – коэффициент запаса.

Коэффициент запаса  $k$  показывает, во сколько раз относительный диаметр дефектной осевой зоны поковки должен быть меньше, чем осевой канал в готовом изделии для предотвращения возможного смещение следов дефектной зоны в процессековки от геометрической оси изделия.

Зависимость (1) позволяет рассчитать максимальнодопустимый относительный диаметр усадочной раковины в теле слитка ( $D_{\text{ур}}$ ) с захоложенной верхней частью, при котором металл с усадочной раковиной будет удалён в отход, зная максимальный относительный диаметр осевого отверстия ( $D_{\text{отв}}$ ) в заготовках, которые производятся из данного слитка. Анализом выпускаемой на предприятии номенклатуры полых поволоков и используя зависимость (1), была установлена величина максимально допустимого относительного диаметра усадочной раковины в слитках с захоложенной верхней частью – 25 %. Для двенадцати типоразмеров изложниц было спроектировано шесть надставок-холодильников, одна надставка на два ближних развеса слитка.

Результаты компьютерного моделирования затвердевания слитков с обратной и прямой конусностью показали, что наиболее оптимальным вариантом является технология отливки слитков, уширенных к низу, средний относительный диаметр усадочной раковины которых составил 23%, максимальный относительный диаметр усадочной раковины составил 24,2 %. В слитках, уширенных к верху, средний относительный диаметр усадочной раковины составил 25%, максимальный относительный диаметр усадочной раковины составил 26,8 %.

Объём захоложенной части слитка, необходимый для формирования усадочной раковины с максимальным относительным диаметром не более 25 % составил 7,0 – 8,4 %. Экономия металла за счёт уменьшения объёма головной части слитка, по сравнению с прибыльными слитками, отливаемыми в те же изложницы, составила от 5,9 до 13,4 %. Массы прибыльных слитков и спроектированных слитков с захоложенной верхней частью, отливаемых в одинаковые изложницы, а так же их параметры представлены в таблице 4.

**Таблица 4. Параметры спроектированных уширенных к низу слитков с захоложенной верхней частью**

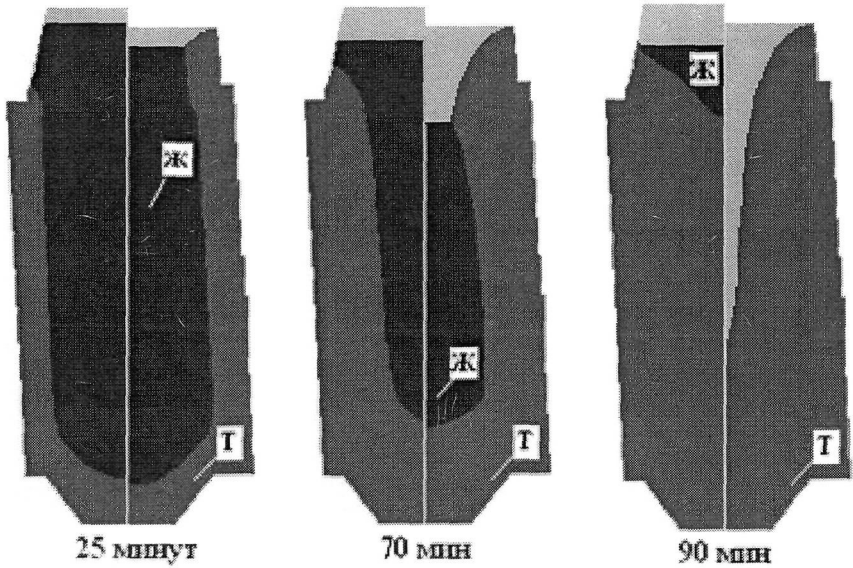
Масса прибыльного слитка, т	Масса слитка с захоложенной верхней частью, т	H/D	k*, %	Масса захоложенной верхней части, %	Максимальный диаметр усадочной раковины в теле слитка D <sub>yp</sub> **, %
2,2	2,07	1,82	10	8,4	22,9
3,3	3,0	1,82	10	7,0	22,6
4,5	4,1	1,69	10	7,5	23,7
5,5	5,1	1,69	10	7,2	21,7
6,5	6,0	1,65	11	7,9	22,1
8,6	7,8	1,60	9	7,0	22,8
10,5	9,6	1,61	10	7,6	23,8
11,8	10,8	1,62	10	7,6	21,8
13,2	12,0	1,62	10	7,8	23,2
14,7	13,5	1,62	10	7,8	22,9
16,8	15,3	1,62	10	7,4	24,2
19,0	17,2	1,58	10	7,4	22,3

\* - конусность тела слитка на обе стороны; \*\* - максимальный диаметр усадочной раковины приведён для слитка с захоложенной верхней частью.

С целью выявления влияния замены утеплённой прибыльной надставки надставкой-холодильником на кристаллизации металла слитков, с помощью компьютерного моделирования было определено время полного затвердевания прибыльных слитков и спроектированных слитков с захоложенной верхней частью, отливаемых в одинаковые изложницы. Результаты расчёта свидетельствуют о том, что спроектированные слитки с захоложенной верхней частью затвердевают на 14 – 35 % быстрее, чем прибыльные слитки, что объясняется, во-первых, уменьшением массы слитков, и во-вторых, ускоренным затвердеванием металла в надставке-холодильнике, по сравнению с металлом в футерованной прибыльной надставке.

На рисунке 8 показан ход кристаллизации металла прибыльного слитка массой 2,2 т и слитка с прямой конусностью с захоложенной верхней частью массой 2,07 т, отлитых в одинаковые изложницы. В слитке с футерованной надставкой последние затвердевающие объёмы металла и тепловой центр находятся в прибыльной части слитка. В слитке с захоложенной верхней частью последние затвердевающие объёмы металла и тепловой центр находятся в центральной части тела слитка, что было подтверждено термометрированием наружной поверхности литейной оснастки при затвердевании слитка, рис.9. Максимальной температуры изложница достигает в точке 2, это означает, что тепловой центр слитка находится на одном горизонте с рассматриваемой точкой.

Ускоренное затвердевание слитков с захоложенной верхней частью, а также изменение расположения теплового центра способствуют снижению химической неоднородности металла по высоте слитков. Наибольшая ликвация углерода в металле слитка массой 2,07 т с захоложенной верхней частью выявлена в осевой центральной зоне тела слитка, в которой затвердевают последние объёмы жидкого металла и которая удаляется при прошивке заготовок, рис.10.



Ж – жидкая фаза; Т – твёрдая фаза.

Рисунок 8. Продвижение фронта кристаллизации в прибыльном слитке (слева) и в слитке с захоленной верхней частью (справа)

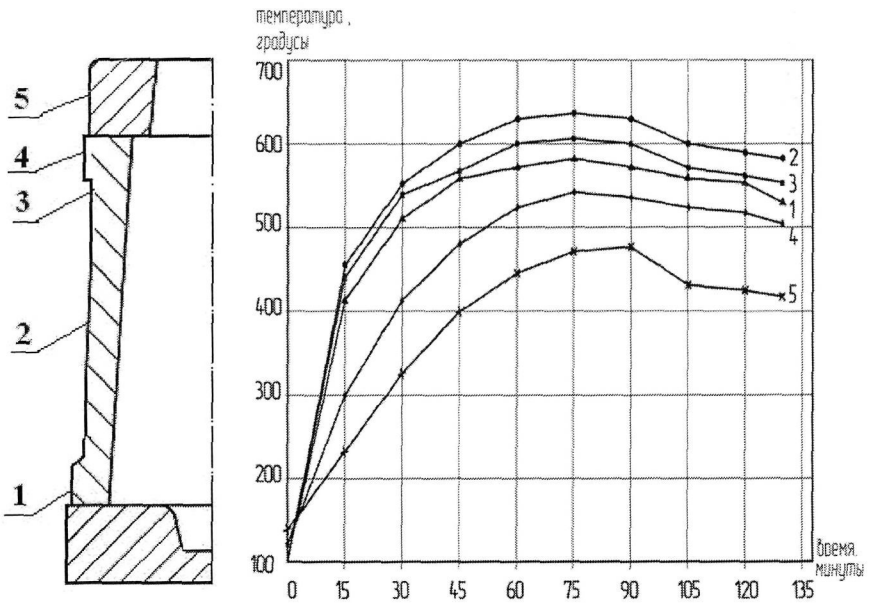


Рисунок 9. Изменение температуры поверхности изложницы при затвердевании слитка с захоленной верхней частью массой 2,07 т

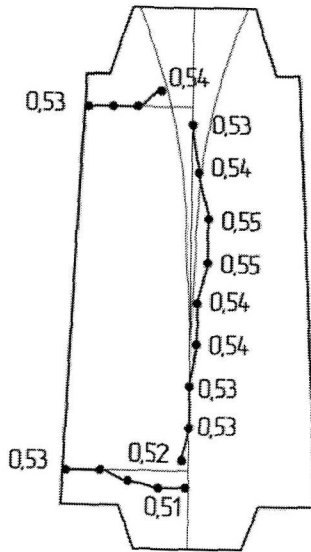


Рисунок 10. Распределение углерода по высоте и сечению слитка с захоленной верхней частью массой 2,07 т

С целью проверки достоверности результатов компьютерного моделирования развития усадочной раковины, из опытного слитка стали 5ХНМФ с прямой конусностью с захоленной верхней частью массой 2,07 т (рис.11) была вырезана осевая плита. Сталь слитка была выплавлена в 25-тонной электродуговой печи ДСП-25 с внепечной обработкой и вакуумированием на установке печь-ковш по технологии с окислением углерода, осадочным раскислением и рафинированием под высокоосновным шлаком. Глубокое раскисление стали производилось алюминием. Сравнительные фактические и расчётные размеры усадочной раковины в опытном слитке представлены в таблице 5 и на рис.12.



Рисунок 11. Опытный слиток стали 5ХНМФ с прямой конусностью с захоленной верхней частью массой 2,07 т

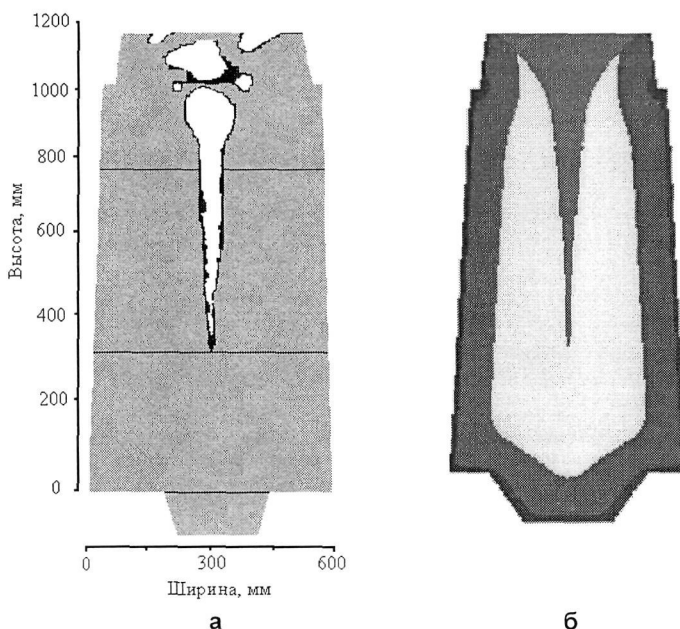


Рисунок 12. Расположение усадочной раковины в опытном слитке, определённое по осевой плите (а) и моделированием затвердевания слитка (б)

Таблица 5. Размеры усадочной раковины в опытном слитке с захоложенной верхней частью массой 2,07 т

Параметр	Расчётная величина	Фактическая величина
Максимальный диаметр усадочной раковины в теле слитка $D_{y.p.}$ , мм (%)	126 (22,9)	135 (24,5)
Протяжённость усадочной раковины в теле слитка $H_{y.p.}$ , мм (%)	611 (61,6)	604 (61)

После заливки металла, теплоизоляция верхней поверхности головной захоложенной части слитка не производилась, чтобы образовавшийся мост металла предохранял стенки усадочной раковины от окисления в процессе нагрева слитка дляковки. Сравнение размеров усадочной раковины в опытном слитке, определённых экспериментом и моделированием затвердевания, показало близкое соответствие результатов, что послужило основанием для изготовления спроектированных надставок-холодильников для всего парка изложниц и внедрения слитка с прямой конусностью с захоложенной верхней частью для изготовления полых изделий в промышленное производство.

Для апробирования разработанных слитков для производства полых заготовок в условиях массового промышленного производства, на предприятии ОАО «Буммаш» было отлито 110 слитков с прямой конусностью с захоложенной верхней частью массой от 2,07 до 12,06 тонн. Из отлитых слитков с захоложенной верхней частью были откованы полые поковки – кольца, диски с

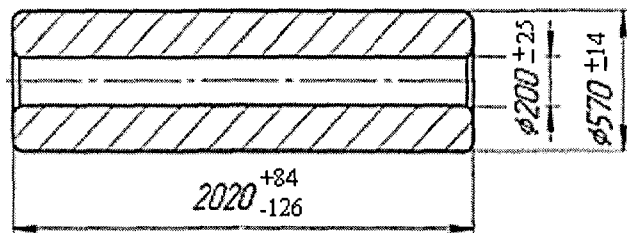
отверстием, цилиндры, трубы. В таблице 6 представлены показатели производства полых поковок из слитков с захоложенной верхней частью, а также показатели производства тех же полых поковок в случае, если бы поковки изготавливались из прибыльных слитков, отлитых в аналогичные изложницы.

**Таблица 6. Показатели производства полых поковок из слитков с захоложенной верхней частью и прибыльных слитков**

Масса откованных полых поковок, т	Масса слитков с захоложенной верхней частью, т	Масса прибыльных слитков, т	Выход годного металла, %	
			слиток с захоложенной верхней частью	прибыльный слиток
564	788	876	71,6	64,4

Применение слитков с прямой конусностью с захоложенной верхней частью вместо прибыльных слитков для изготовления полых поковок дало повышение выхода годного металла слитка в среднем на 7,2 %. Замена утепленной прибыльной надставки надставкой-холодильником обеспечило экономию теплоизоляционных материалов и снизило трудоёмкость подготовки литейной оснастки. Уменьшение массы слитков позволило повысить пропускную способность разливочного пролёта за счёт сокращения времени затвердевания слитков и снизить расход газа на нагрев слитков перед ковкой.

Для сопоставления уровня и характера изменения механических свойств металла полых поковок, изготовленных из слитков с прямой конусностью с захоложенной верхней частью и прибыльных слитков, было отлито двенадцать слитков: шесть слитков массой 5,1 т каждый отлито с использованием надставки-холодильника и шесть слитков массой 5,5 т каждый – с утепляющей прибыльной надставкой. Слитки разных типов отливались в одинаковые изложницы, из металла одной плавки стали 09Г2С, ГОСТ 19281-89. Выплавка стали 09Г2С производилась по типовой технологии предприятия в электродуговой печи ДСП-25 с внепечной обработкой на установке печь-ковш. Из каждого слитка было отковано по одной поковке одинакового размера типа «труба», номинальной массой 3,67 т каждая. Металл поковок был подвергнут термообработке – нормализации с отпуском для получения величин механических свойств на уровне КР245, ГОСТ 8479-70. Эскиз поковки представлен на рис.13. Кольца для отбора образцов металла на испытания механических свойств вырезались от каждого конца поковки, что соответствует головной и донной частям слитка.



**Рисунок 13. Эскиз поковки, изготовленных из слитков с захоложенной верхней частью и прибыльных слитков**

Для сопоставления уровня механических свойств, сравнивались усреднённые значения механических свойств металла поковок, изготовленных из слитков с захоложенной верхней частью и прибыльных слитков. Равномерность распределения механических свойств металла по концам поковок оценивалась по коэффициенту равномерности  $W$ :

$$W = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{M_{\text{ср}}} \cdot 100\% \quad (2)$$

- где  $W$  – коэффициент равномерности механических свойств, %;  
 $M_{\max}$  – максимальное значение данной механической характеристики;  
 $M_{\min}$  – минимальное значение данной механической характеристики;  
 $M_{\text{ср}}$  – среднее значение данной механической характеристики.

**Таблица 7. Механические свойства поковок, изготовленных из слитков с захоложенной верхней частью и прибыльных слитков**

Тип слитка	Параметр сравнения	Механические свойства					
		$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCU <sup>+20</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	НВ
С захоложенной верхней частью	Среднее значение	292	494	31	62	128	158
	Разница между минимальным и максимальным значением	41	42	7	17	71	16
	Коэффициент равномерности $W$ , %	14	8,5	22,6	27,4	55,5	10,1
Прибыльный	Среднее значение	297	500	29	59	126	164
	Разница между минимальным и максимальным значением	57	55	8,4	20	78	23
	Коэффициент равномерности $W$ , %	19,2	11	29	33,9	61,9	14
Изменение дисперсии механических свойств, раз		1,4	1,3	1,3	1,24	1,1	1,4

Анализ представленных в таблице 7 данных показал, что прочностные и пластические свойства, а также величина ударной вязкости металла полых поковок практически находятся на одном уровне, применительно для условий промышленного производства и удовлетворяют требованиям ГОСТа. При этом,

металл полых поковок прибыльных слитков обладает несколько большим значением прочностных свойств, но меньшим значением пластических свойств, что объясняется большей ликвацией углерода по высоте и сечению прибыльных слитков, по сравнению со слитками с заоложенной верхней частью.

Значение коэффициента равномерности распределения механических свойств металла по концам поковок, откованных из слитков с заоложенной верхней частью в 1,1 – 1,4 раза меньше, чем поковок, откованных из прибыльных слитков. Это обусловлено более равномерным распределением ликвирующих элементов по высоте слитков с заоложенной верхней частью.

Загрязненность металла поковок, изготовленных из прибыльных слитков и слитков с заоложенной верхней частью, в обоих случаях не превышает 2 балла, по ГОСТ 1778-70.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основании проведенных исследований тепловой работы кузнечных слитков установлен ряд действенных факторов, с помощью которых можно управлять расположением и формой усадочной раковины и кристаллическим строением слитка. К таким факторам относятся:

- замена утепляющей прибыльной надставки массивной надставкой-холодильником, которая заоложивает верхнюю часть слитка, что позволяет формировать сосредоточенную вдоль оси слитка усадочную раковину, а также увеличить относительную ширину зоны столбчатых кристаллов на 30–85% , по сравнению с прибыльными слитками;

- изменение обратной конусности слитка на прямую путём установки изложницы на поддон большим сечением в низ, в результате чего, при прочих равных условиях уменьшается максимальный относительный диаметр усадочной раковины в теле слитка с заоложенной верхней частью в среднем на 3 %.

2. Исследование опытно-промышленных слитков массой от 2,07 до 17,2 тонны позволило установить ряд преимуществ и особенностей затвердевания слитка с заоложенной верхней частью по сравнению с прибыльным слитком нормальной геометрии:

- металл слитка с заоложенной верхней частью химически более однороден, что обусловлено его ускоренным затвердеванием в результате замены прибыльной надставки надставкой-холодильником. В слитке с заоложенной верхней частью массой 2,07 т установлено отсутствие положительной ликвации серы и фосфора в верхней части тела слитка по всему сечению. Суммарная ликвация углерода, серы и фосфора меньше аналогичной ликвации элементов в прибыльном слитке массой 1,7 т соответственно в 3,3, 1,2 и 1,7 раза.

- в слитке с заоложенной верхней частью последние затвердевающие объёмы металла и тепловой центр находятся в центральной части тела слитка, что обуславливает наибольшую ликвацию углерода в осевой центральной зоне тела слитка, которая удаляется при прошивке заготовок;

- объём верхней заоложенной части слитка, необходимый для формирования вытянутой вдоль оси усадочной раковины, меньше объёма прибыльной части слитков, что позволяет при производстве полых поковок повысить выход годного.

3. Разработаны и внедрены кузнечные слитки с прямой конусностью с заоложенной верхней частью двенадцати развесов массой от 2,07 до 17,2 тонны для изготовления полых изделий.

4. При изготовлении полых поковок из спроектированных слитков с прямой конусностью с заоложенной верхней частью достигнуто уменьшение дисперсии

механических свойств металла по концам полых поковок в 1,1 – 1,4 раза, по сравнению с металлом аналогичных поковок, откованных из прибыльных слитков.

5. Внедрение на ОАО «Буммаш» слитков с прямой конусностью с захлаженной верхней частью для производства полых поковок позволило повысить выход годного металла в среднем на 7,2 % за счёт снижения головной обрезки. Экономический эффект на опытно-промышленной партии составил 1,867 млн.руб.

Основные положения диссертационного исследования опубликованы в следующих работах:

1. Выбор рациональной схемы отливки кузнечного слитка для производства полых поковок / М.В.Колодкин., С.И.Жульев., В.С.Дуб., А.Н.Ромашкин., А.Н.Мальгинов // *Электрометаллургия*.–2009.–№8. –С.26-29.

2. Проектирование кузнечных слитков для определённых типов поковок на ОАО «Буммаш» / М.В.Колодкин // «состояние, проблемы и перспективы развития обработки материалов давлением»: Сб.докладов и материалов VIII Конгресса «Кузнец-2008», Рязань, 13-16 мая 2008г./ ОАО «Тяжпрессмаш». – Рязань, 2008. – С.274-277.

3. Оптимизация производства поковок за счёт разработки геометрии неприбыльных кузнечных слитков / М.В.Колодкин., Д.В.Рущий., С.И.Жульев // *Изв.ВолгГТУ.Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении*. Вып.2: межвуз.сб.науч.ст./ ответ. Ред.Трыков Ю.П.; ВолгГТУ. – 2008. –№10(48). –С.162-164.

4. Слиток для полых поковок / М.В.Колодкин., О.А.Комолова., А.Н.Мальгинов // *Вестник Донецкого Национального Университета. Сер.А–Естественные науки. Часть 1./ ДонНУ*. –2009. –№1. –С.263-265.

5. Проектирование кузнечных слитков на ОАО «Буммаш» / С.И.Жульев., М.В.Колодкин // *Вестник Удмуртского Университета. Вып 1. Физика. Химия / УдГУ*. –2008. –С.101-106.

6. Проектирование технологии производства кузнечного слитка / В.М.Колодкин., В.С.Княжин., М.В.Колодкин // *Вестник Удмуртского Университета. Вып 1. Физика.Химия / УдГУ*. –2008. –С.120-128.

7. Разработка специальной технологии производства кованных труб как фактор повышения уровня экологической безопасности / М.В.Колодкин // *Безопасность критических инфраструктур и территорий : материалы III Всероссийской научно-технической конференции, Екатеринбург, 9-14 ноября 2009г.* –С.218-219.

8. Экологическая составляющая современных металлургических технологий на примере ОАО «Буммаш» / М.В.Колодкин // *Экологическая безопасность : Сб.статей / Ижевск: Издательский дом «Удмуртский Университет».* –2004. –С.201-202.

9. Экономический аспект безопасности в техносфере на примере производства поковок / М.В.Колодкин // *Безопасность в техносфере : материалы Всероссийской конференции, выпуск 4, Ижевск, 2008 / Институт исследования природных и техногенных катастроф УдГУ.* –Ижевск. –2008. –С.150-158.

10. Экологически целесообразная технология производства кованных труб / М.В.Колодкин // *Безопасность в техносфере, выпуск 5 : Сб.статей / Ижевск: Издательский дом «Удмуртский Университет».* –2009. –С.192-197.

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

В работах [1,6] автором, на основе результатов исследования физической и химической неоднородности стальных слитков спокойной стали различной геометрии, предложена оптимальная геометрия слитка для производства полых поковок. В статьях [3,4] представлены результаты, полученные автором с помощью компьютерного моделирования затвердевания слитка, определяющие закономерности формирования усадочной раковины в теле слитка с захлаженной верхней частью.

В работах [2,5,7,8,9,10] автором приводятся результаты проектирования геометрических параметров слитков и технологии отливки, позволившие повысить выход годного металла слитка и качество металла поковок.

Подписанов в печать 10.03.2010 г. Заказ № 54. Тираж 100 экз. Печ. л. 1,0.  
Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Типография ОАО «Буммаш».  
426050, г.Ижевск, ул.Воткинское Шоссе, 170