

На правах рукописи

Руцкий Дмитрий Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ КУЗНЕЧНЫХ
СЛИТКОВ ДЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗАГОТОВОК ТЯЖЕЛОГО
МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Специальность 05.16.02

«Металлургия чёрных, цветных и редких металлов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук



Волгоград – 2006

Работа выполнена на кафедре Технология материалов Волгоградского государственного технического университета.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Жульев Сергей Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Кудрин Виктор Александрович
кандидат технических наук
Макарьчева Елена Владимировна

Ведущее предприятие: ЗАО «Волгоградский Metallургический Завод «Красный октябрь»

Защита состоится 27 марта 2006 г в 14 часов на заседании диссертационного совета Д217 042.01 при Федеральном государственном унитарном предприятии «Государственный научный центр Российской Федерации – Научно-производственное объединение по технологии машиностроения (ЦНИИТМАШ)» по адресу: 115088, Москва, ул. Шарикоподшипниковская, д.4, комн.403.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГУП «ЦНИИТМАШ»

Автореферат разослан 21 февраля 2006 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
Доктор технических наук, профессор



И В. Валисовский

2006 А
3921

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Увеличение мощности агрегатов в тяжелой промышленности, энергетике, судостроении и др отраслях промышленности, обуславливает повышение потребности в увеличении массы крупных слитков для производства роторов турбин, судовых валов, сосудов высокого давления и т.п. С ростом веса слитка усиливаются его пораженность различного рода дефектами. К таким дефектам относится общая ликвационная неоднородность, наиболее ярко выражающаяся в наличии области отрицательной ликвации в нижней трети слитка, а также в повышенном содержании ликватов в верхней части осевой зоны.

Проблемой получения качественных кузнечных слитков занимались и занимаются в настоящее время ряд российских и иностранных ученых – Н.И. Хворинин, В.А. Ефимов, С.Я. Скобло, Е.А. Казачков, В.С. Дуб, С.И. Жульев Я.Е., Затуловский, D. Turnbull, Е.М. Китаев и многие другие. Их работы подтверждают, что получение однородного по химическому составу слитка является сложной задачей.

Неоднородность химического состава металла наблюдается как по высоте, так и по сечению слитка. При изготовлении крупных и длинномерных изделий большой массы различие в химическом составе верхней и нижней частей слитка, и соответственно поковки, часто приводит к значительному отклонению в механических свойствах по длине заготовки. В промышленной практике для выравнивания механических свойств производят высокий отпуск с различными температурами по длине заготовок. При этом разница в величинах температур по концам поковок достигает 50 - 120°С. Помимо чисто технологических трудностей в проведении данного режима термической обработки, он не стабилен и не всегда дает желаемый результат. Такое положение затрудняет аттестацию и приводит к отбраковке готовых изделий на заключительной стадии изготовления.

Повышения однородности механических свойств металла крупногабаритных изделий можно достичь выравниванием химического состава по длине и сечению исходных слитков. В настоящее время разработаны способы внешних воздействий, улучшающих качество слитка, таких как: вибрация, внутренние микро и макрохолодильники, импульсная обработка и др.

Вместе с тем, не достаточно внимание уделяется поиску новых геометрических параметров слитков: отношения высоты к среднему диаметру (H/D) и оптимизации технологических параметров их разлива.

В связи с этим, актуально более углубленное исследование закономерностей изменения структуры и химического состава слитков различной массы и геометрии, а также изготавливаемых из них поковок.

Кроме того, необходимо усовершенствовать температурные и скоростные режимы отливки слитков.

Цель работы: Получение химически однородных крупногабаритных кузнечных заготовок ответственного назначения.

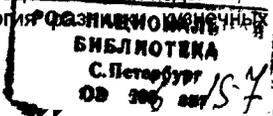
Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи.

1) Определены закономерности изменения структурной и химической неоднородности слитков, идущих на производство трубных заготовок, роторов турбогенераторов и гребных валов,

2) Проведен анализ распределения химических элементов по длине и сечению кузнечных заготовок для выявления закономерностей наследования химической неоднородности поковкой от слитка;

3) Предложен, опробован, исследован и внедрен в производство новый удлиненный двоярный прибыльный слиток для производства полых изделий.

4) Исследована и скорректирована технология производства кузнечных слитков



обычной геометрии массой 24,2 и 50т.

Методы исследования. Экспериментальная часть работы выполнена с применением методов оптической и растровой микроскопии OLYMPUS BX21, НЕОРНОТ NU2/E, MSM-2, твёрдомеров, а также разработанных новых оригинальных методик с использованием компьютерных программ – определения плотности дендритной структуры¹ и моделирования процесса кристаллизации слитка.

Научная новизна:

1. Установлено, что в слитках массой 20-50 т обычной геометрии (H/D~2,0) из конструкционной Cr-Ni-Mo стали с содержанием углерода 0,3-0,4% зона отрицательной ликвации углерода и других химических элементов составляет примерно треть по объему и высоте слитка, что связано с интенсивным теплоотводом и особенностями кристаллизации в донной части слитка. В теле поковки зона отрицательной ликвации простирается на величину равную 1/3 .. 1/4 ее высоты, что с учетом положительной ликвации с головной части приводит к значительному разбросу показателей механических свойств.

2 Увеличение зоны интенсивного теплоотвода удлиненного слитка по сравнению с обычными и укороченными слитками той же массы приводит к более равномерному распределению ликвирующих примесей. Впервые установлено, что использование удлиненных сдвоенных прибыльных слитков с увеличенным параметром H/D до 4 и более, позволяет снизить химическую неоднородность слитков и поковок в 3 – 4раза.

3 На основе анализа технологических факторов разливки слитков установлено, что:

- изменение скорости наполнения от 1,7 до 2,5 т/мин слитков массой 24,2 и 50 т снижает ликвацию и уменьшает разницу в содержании углерода между противоположными концами заготовок, полученных из этих слитков, с 0,10 до 0,05%;
- понижение температуры металла при разливке слитков также приводит к снижению ликвации углерода до 0,03 – 0,06%

Практическая ценность. Освоен новый сдвоенный прибыльный слиток массой 42,26т, что позволило повысить выход годного металла в поковку с 58 до 66%. Использование нового слитка, при удвоенном количестве поковок, снизило химическую неоднородность в 3раза и повысило стабильность механических свойств в 5раз Усовершенствованна и внедрена ускоренная технология разливки нормальных слитков массой 24,2 и 50т Данная технология снизила ликвационную неоднородность в 1,5 – 2раза и повысила стабильность механических свойств в поковках в 4раза

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались на 5 международных конференциях (Волгоград, 2002 г , Темиртау, 2003 г , Самара 2004 – 05гг , Магнитогорск 2005г), а также на ежегодных научно-технических конференциях ВолгГТУ (2002+2005 гг.).

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 26.03 2003.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 печатных работ, в том числе 1 статья в центральном рецензируемом журнале.

¹ В детальном исследовании слитков принимали участие аспиранты кафедры «Технология материалов» Волгоградского государственного технического университета Федоров Д Н , Живов М Е , Шамрей В А , Бод К Ю , Шелухина Ю М , Мозговой А В

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, общих выводов, списка литературных источников и приложения, содержит 140 страниц машинописного текста, 67 рисунков, 24 таблицы, 4 приложения и список литературы из 106 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 и формирования химической и структурной неоднородности слитков, а также приведены виды дефектов, вызванных неоднородностью химического состава металла

За последнее время, как в отечественной, так и в зарубежной литературе уделяется много внимания вопросу изучения механизма образования ликвации в слитках. Однако, до сих пор нет единой универсальной теории, объясняющей это явление, еще во многом не изучена взаимосвязь процессов затвердевания металлов и образование в нем различных ликвационных зон

В практических условиях металлургического производства в процессе кристаллизации стального слитка развивается химическая неоднородность металла. Различают два типа 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 локализованных участках – зонах слитка. К ней относят области отрицательной, положительной и внецентренной ликвации.

Ликвационные явления могут возникнуть в результате следующих особенностей затвердевания стали:

- изменение растворимости в жидком расплаве при понижении температуры, а также при переходе из жидкого в твердое состояние;
- разделение сплава, как жидкого, так и взвешенных кристаллов, на составляющие по различию в удельном весе;
- одновременному сосуществованию в течение длительного промежутка времени жидкой и двухфазной областей, что способствует протеканию диффузии примесей в жидкой и твердой фазах.

С повышением массы слитка дефекты, связанные с зональной ликвацией, увеличиваются. Различие химического состава между головной и донной частями слитка достигает 2 и более раз.

У всех слитков, независимо от их массы и марки стали, в нижней части расположена зона отрицательной ликвации, которая занимает примерно 35% высоты слитка. В нижней его части видна тенденция к снижению ликватов при смещении от периферии к центру, что объясняется наличием в этой области седиментационного конуса осаждения из кристаллов обедненных легкоплавкими составляющими. В верхних горизонтах слитка наблюдается обратная закономерность распределения ликватов

В настоящее время существует много способов повышения химической однородности слитков. В изложницах, с утеплением верхней трети, относительная высота области отрицательной ликвации на 10% больше, чем в слитках отлитых с обычной прибыльной надставкой. Отливка стали в бесприбыльные слитки уменьшает степень развития химической неоднородности. Использование слитков небольшой массы, с высоким отношением H/D, также уменьшает их химическую неоднородность.

Во второй главе приведены сведения и схемы отливки исследуемых слитков массой от 1,7 до 140т. с различным отношением высоты к среднему диаметру (H/D от 1,9 до 4).

Описана методика исследования химической неоднородности по пробам, отобранным с различных горизонтов исследуемых слитков. Предложена методика исследования слитков по ряду параметров, с применением компьютерной техники, – химическому составу стали, количеству кристаллов, их величине, длине и углу наклона к горизонтали наибольших осей дендритов. По совокупности всех этих параметров определяли границы структурных зон слитков (рисунок 1).

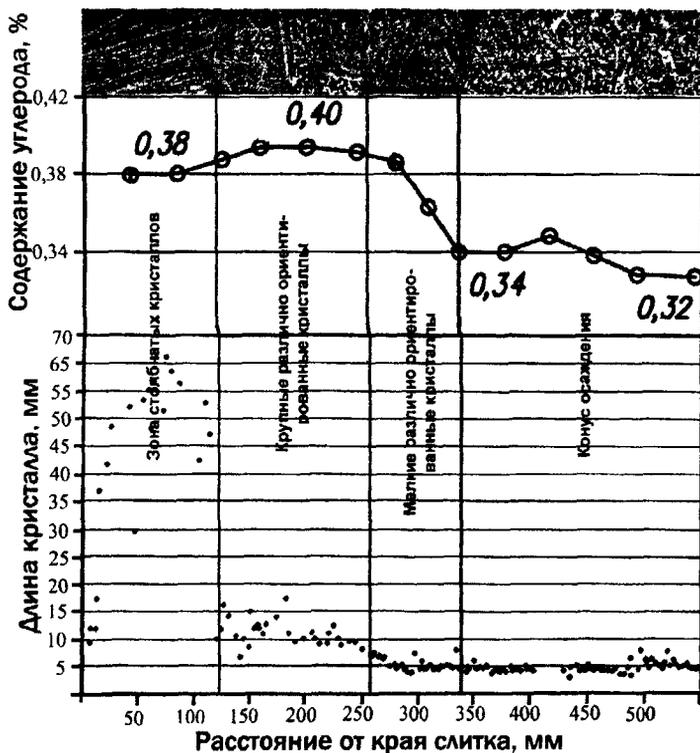


Рисунок 1 – Кристаллические зоны слитка, выявленные исследованием структуры и химического состава металла

Описана методика исследования химической неоднородности в крупногабаритных поковках. Проведено статистическое исследование массива данных, состоящего из 245 трубных поковок, 31 гребного вала, 10 валов роторов турбогенераторов, изготовленных из слитков массой от 24,2 до 140т, с выявлением технологических параметров разливки, оказывающих влияние на химическую однородность слитков.

В третьей и четвертой главах приведены результаты исследования химической неоднородности и кристаллического строения слитков различной массы (от 1,7 до 140т) и геометрии ($H/D \sim 1,9 - 4$), и изготавливаемых из этих слитков крупногабаритных длинномерных заготовок.

Выявлены следующие закономерности в распределении элементов по высоте и

сечению продольного осевого темплета обычного прибыльного слитка массой 24,2т стали марки 38ХНЗМФА. (см. рисунок 2, таблицу 1).

В исследуемом слитке имеется как область положительной ликвации, так и область отрицательной ликвации (нижняя 1/3 тела слитка) При этом, если область отрицательной ликвации имеет сужающееся с переходом в верхние горизонты конусообразное строение, то область положительной ликвации, сосредоточена в узкой ушряющей кверху осевой зоне верхней части слитка. Выше конуса осаждения (см. рисунок 2) ликвация переходит в положительную, достигая максимального развития в прибыльной зоне. Изменение содержания ликвирующих элементов по вертикальной оси слитка происходит не монотонно, а волнообразно.

В нижней части слитка (см рисунок 2) пониженное содержание имеют все элементы При этом, в верхних горизонтах слитка, где ликвация принимает положительное значение, наиболее склонны к ликвации такие элементы, как углерод, сера и фосфор.

Максимальное значение отрицательной ликвации углерода в нижней части составляет – 23%, в верхней + 20%, в прибыльной части + 52% соответственно (см рисунок 2). Суммарная ликвация углерода по высоте тела слитка составляет 43%. Такая же закономерность наблюдается для серы и фосфора, которые имеют следующие значения: степень отрицательной ликвации в нижней части слитка – 30, – 40%, а максимальный уровень положительной ликвации этих элементов непосредственно под прибылью достигает + 30 и + 29%, в прибыльной части ликвация серы и фосфора возрастает до + 80 и +50%. Общая ликвация этих элементов в слитке по высоте тела составляет 60 и 69%.

Сопоставление размеров кристаллов со средними значениями состава металла в различных структурных зонах (см.таблицу 1) показало, что в зоне последовательной кристаллизации (столбчатых кристаллов) их величина достигает 24мм при протяженности зоны 2500мм, химический состав стали в данной зоне практически соответствует ковшевому (C_s -0,38%, S_s -0,010%, P_s -0,013%).

Таблица 1 – Параметры зон слитка массой 24,2т стали марки 38ХНЗМФА

Параметр	Зоны				
	Столбчатые кристаллы	Крупные различно ориентированные	Мелкие различно ориентированные	Конус осаждения	Осевая зона
Слиток, отлитый по обычной технологии					
Размер кристаллов, мм	15...90 24	6,5...14 9,90	4...8 6,5	4...6 4,5	4...15 5,6
Плотность кристаллов, см ⁻¹	0,5...2,5 1,71	1...3 1,69	2...4,5 2,65	2...4 2,73	1...3 2
Содержание углерода, %	0,37 – 0,39 0,38	0,36 – 0,47 0,41	0,38 – 0,40 0,39	0,30 – 0,38 0,34	0,39 – 0,46 0,43
Содержание серы, %	0,009 – 0,011 0,010	0,008 – 0,013 0,012	0,009 – 0,013 0,011	0,008 0,009 0,0086	0,011 0,015 0,013
Содержание фосфора, %	0,009 – 0,015 0,013	0,009 – 0,015 0,013	0,009 – 0,014 0,011	0,008 0,013 0,010	0,015 0,018 0,017

Примечание – в числителе интервал разброса значений, в знаменателе среднее значение

В нижней части слитка, в зоне конуса осаждения, размер кристаллов минимален и составляет в среднем 4,5мм Наряду с мелкокристаллической структурой в зо-

не конуса осаждения имеется пониженное содержание химических элементов 0,34% углерода и 0,008, 0,010% серы и фосфора соответственно (см. таблицу 1).

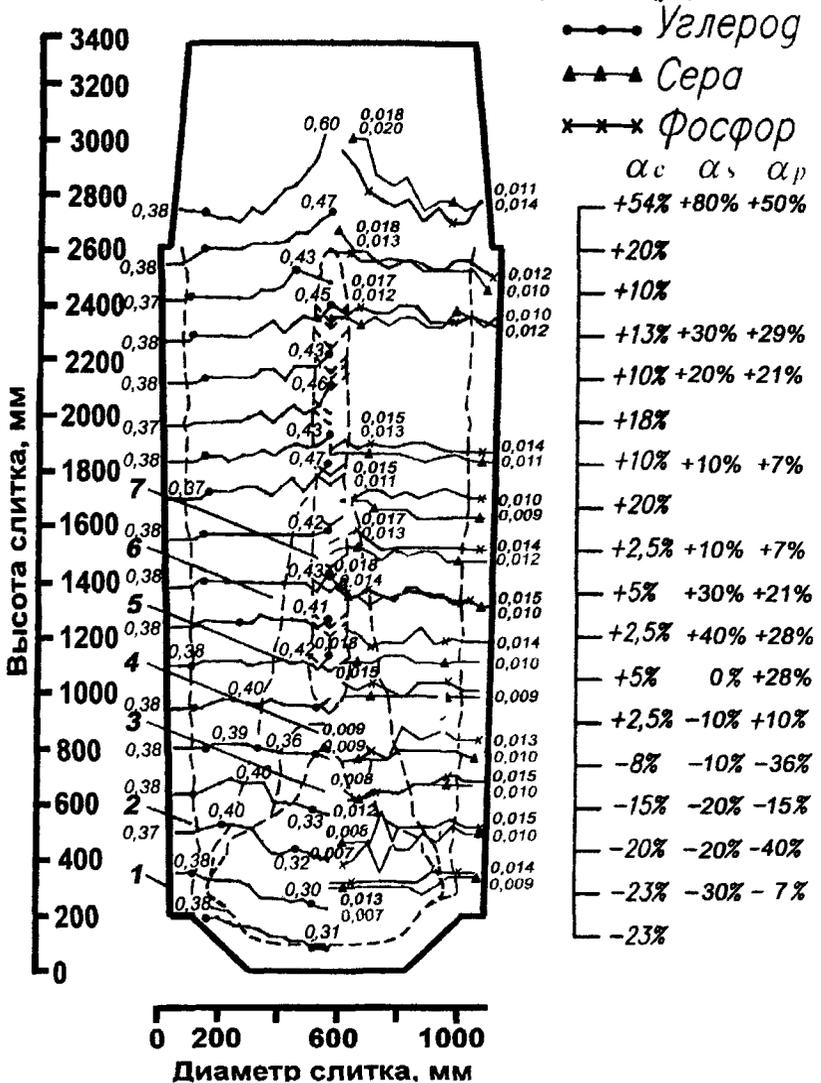


Рисунок 2 – Распределение углерода, серы и фосфора по высоте и сечению слитка массой 24,2т стали марки 38ХНЗМФА
 1—зона конуса осаждения, 2—зона дугообразных трещин, 3—зона мелких различно ориентированных дендритов;
 4—осевая зона; 5—зона крупных различно ориентированных кристаллов, 6—зона столбчатых кристаллов, 7—корковая зона
 *—пунктирными линиями показаны структурные зоны в слитке

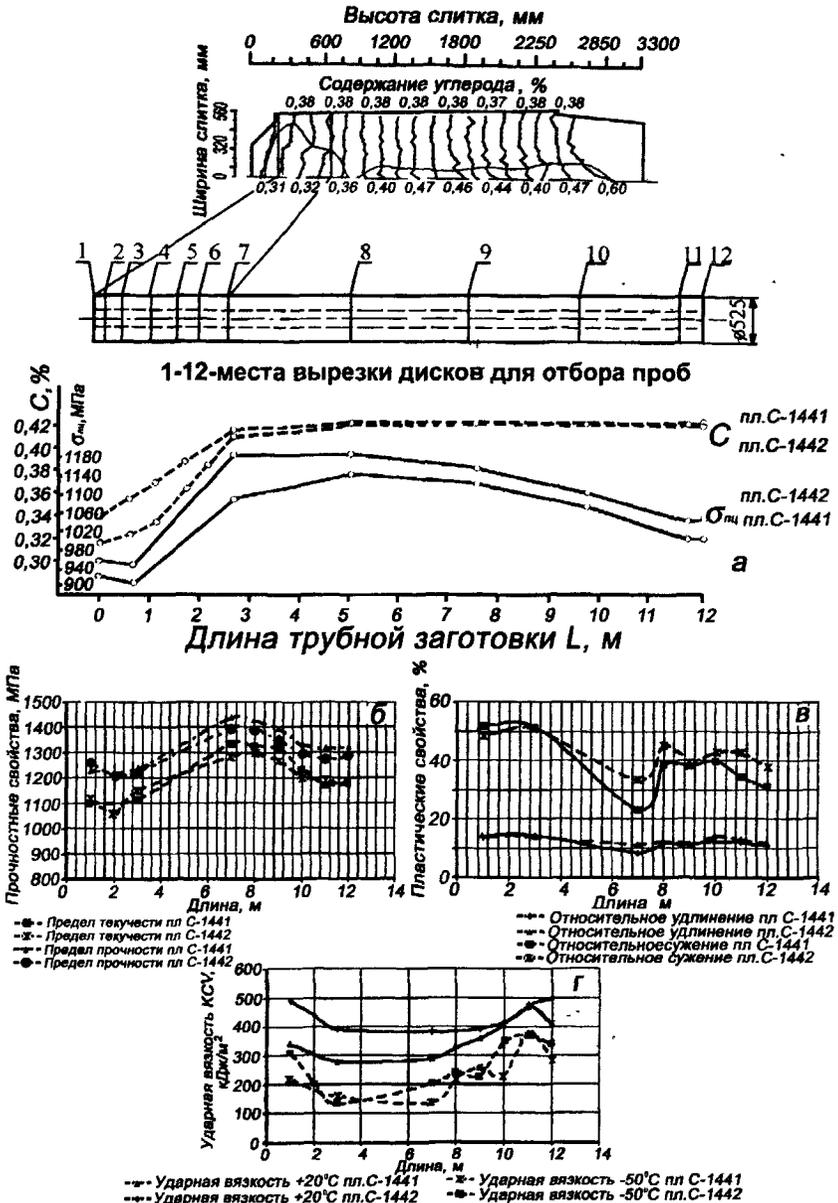


Рисунок 3 – Изменение содержания углерода и предела пропорциональности (а), прочностных свойств (б) и пластических (в, г) по длине трубной поковки, изготовленной из слитка массой 24,2т стали 38ХНЗМФА.

В окружающих конус осадения объемах кристаллы крупнее. В зонах крупных и мелких различно ориентированных кристаллов их размер достигает 9,90 и 6,5 мм соответственно. Содержание углерода, серы и фосфора составляет 0,43/0,38%, 0,012/0,010% и 0,013/0,011% (см. таблицу 1). В осевой зоне, наряду с большим количеством физических дефектов, вызванных усадкой стали (трещины, пористость и т.д.), наблюдается повышенное скопление примесей.

Химическая неоднородность тесно связана со «структурной» неоднородностью (связь химического состава стали с размером кристаллов) и физической неоднородностью (осевая зона). Установленные особенности структуры и закономерности изменения химического состава металла, исследуемого слитка, позволили уточнить особенности затвердевания стали в изложнице.

Кроме подробного изучения металла слитков исследованию подвергались поковки, изготавливаемые из них. Исследовались трубные поковки, изготавливаемые из слитков массой 24,2 т.; две заготовки были разрезаны на кольцевые диски. С дисков отбирались образцы для определения химического состава стали и механических свойств.

Установлено: что в металле поковок с I конца, соответствующего нижней части слитков (см. рисунок 3), на длину равную 2 метра, имеется пониженное содержание углерода 0,31 – 0,34, что отличается от состава металла поковки на остальной ее длине ($C=0,42\%$).

Причиной неравномерного содержания углерода в поковке является высокая химическая неоднородность слитка, из которого она изготовлена. Содержание углерода в нижней ее части составляет приблизительно 0,30–0,35%, что соответствует химическому составу металла нижней части слитка (0,30–0,36%) (см. рисунок 3). Степень отрицательной ликвации углерода в нижней части слитка и поковки составляет – 23% (см. рисунок 2, 3). Такое различие в содержании углерода по концам приводит к разбросу механических свойств по длине поковки.

Анализ результатов механических испытаний показал, что в поковке с донного конца имеется не только пониженное содержание углерода, но и меньший уровень механических свойств (прочностных характеристик). Разница в величинах предела пропорциональности по концам изделия составляет 240 – 260 МПа (см. рисунок 4), а предела прочности и предела текучести соответственно 150 и 250 МПа.

Например, величины значений ударной вязкости KCV по противоположным концам заготовки отличаются на 100 – 150 кДж/м². Разница в характеристиках относительного сужения 30%.

Неравномерность механических свойств, по длине заготовки, усложняет термическую обработку, приводя к переработкам и повторным испытаниям. При этом приходится обеспечивать температуру отпуска на одном конце изделия 540°C, а на другом 700°C.

Параллельное исследование осевого сечения 103 т слитка стали 38ХНЗМФА и вала ротора турбогенератора, изготовленного из него, также показало похожую картину (см. рисунок 4). С I² конца заготовки (нижняя часть слитка) содержание углерода в металле ниже плавочного ($C_k=0,34\%$) и на 3^{ем} длины и составляет 0,28–0,30%.

Такую же неоднородность можно наблюдать и в распределении серы и фосфора. Их отличие от плавочного состава ($S_k=0,016$; $P_k=0,015\%$) в нижней части слитка и поковки достигает 0,008 и 0,012%.

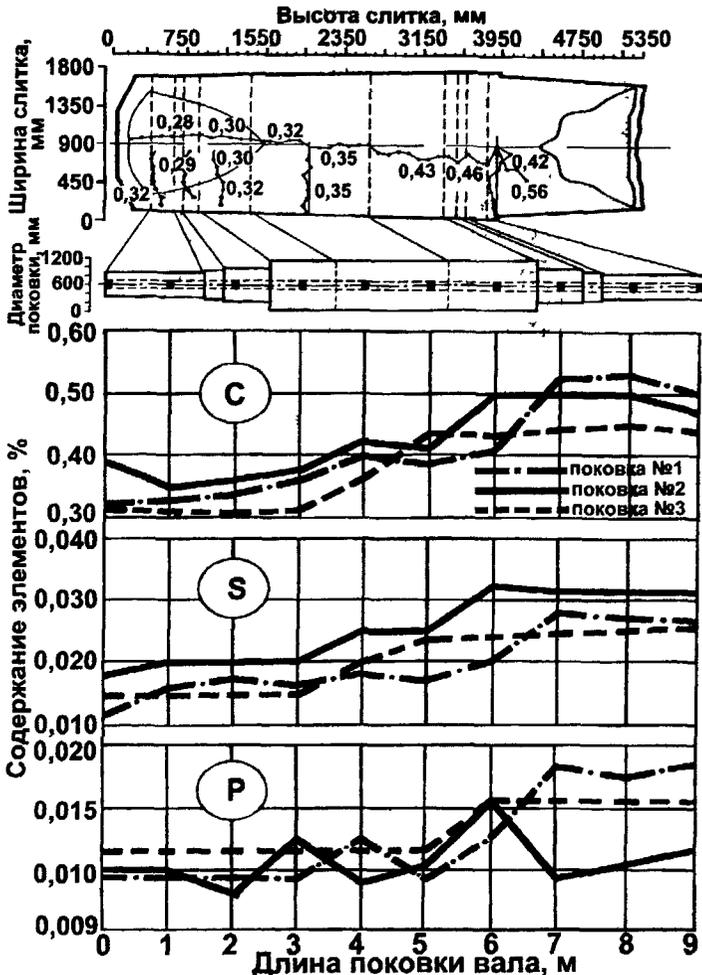


Рисунок 4 – Химическая неоднородность вала ротора из слитка массой 103т.

Статистическая обработка данных по ливкации примесей в слитках различной массы (10 – 140т.) позволила построить следующий график (см. рисунок 5). Из которого были определены логарифмические зависимости (см формулу 1 - 3), показывающие влияние массы слитка на ливкацию элементов в нем

$$\alpha_p = 33,319 \cdot \ln(m_{cn}) - 86,43 \quad R^2=0,81 \quad (1)$$

$$\alpha_c = 21,64 \cdot \ln(m_{cn}) - 31,861 \quad R^2=0,68 \quad (2)$$

$$\alpha_s = 21,905 \cdot \ln(m_{cn}) - 30,797 \quad R^2=0,70 \quad (3)$$

где α_c , α_s , α_p – ливкация углерода, серы и фосфора, %

m_{cn} – масса слитка, т

R^2 – коэффициент корреляции

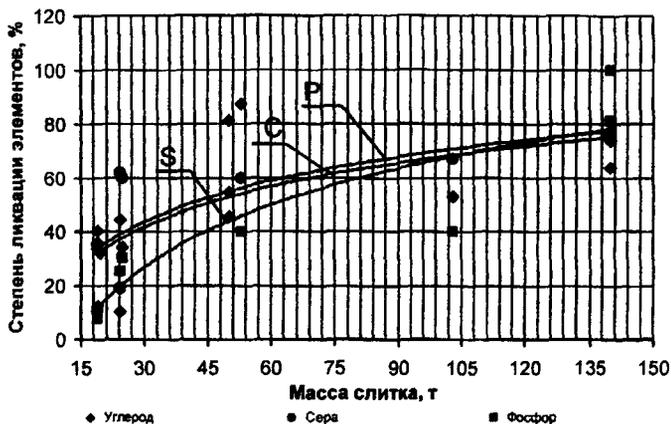


Рисунок 5 – Ликвация элементов в прибыльных слитках (H/D–2)

Исследование химической неоднородности слитков с различным отношением H/D показало, что в нижней части удлиненных слитков, в конусе осаждения, наблюдается отрицательная ликвация углерода, серы и фосфора. При переходе к верхним горизонтам слитка степень химической неоднородности принимает положительную величину и достигает своих наибольших значений в узких приграничных участках усадочной раковины. Причем, максимального значения ликвация достигает в объемах, прилегающих к её вершине (см. рисунок 6). Вместе с тем, необходимо отметить, что периферийные слои удлиненного прибыльного слитка имеют равномерное распределение ликвирующих элементов.

Сравнение степени ликвационной неоднородности в слитках различной геометрии показывает, что металл удлиненного слитка более однороден. Слитки небольшой массы имеют незначительное различие степени ликвационной неоднородности. При увеличении массы слитков разница в химической неоднородности между удлиненными и обычными слитками увеличивается.

На рисунке 6 представлены фактические значения химической неоднородности в удлиненных слитках массой 2,99т, и обычных прибыльных слитках – массой 2,88т и 50т.

В удлиненном слитке массой 2,99т суммарная ликвация углерода составляет 30%, а в обычном прибыльном слитке массой 2,88т–38% соответственно.

В слитках большей массы 50 и 51т. химическая неоднородность удлиненного слитка ($\Sigma C=68\%$) заметно меньше, чем обычного слитка ($\Sigma C=100\%$). Суммарная ликвация углерода в удлиненном слитке в 1,5раза меньше, чем в обычном.

Для определения математической зависимости и установления корреляции между H/D и ликвацией углерода, серы и фосфора в слитке, данные химического анализа по распределению примесей в разорванных взрывом 30 слитках были статистически обработаны и получены следующие зависимости (см. рисунок 7):

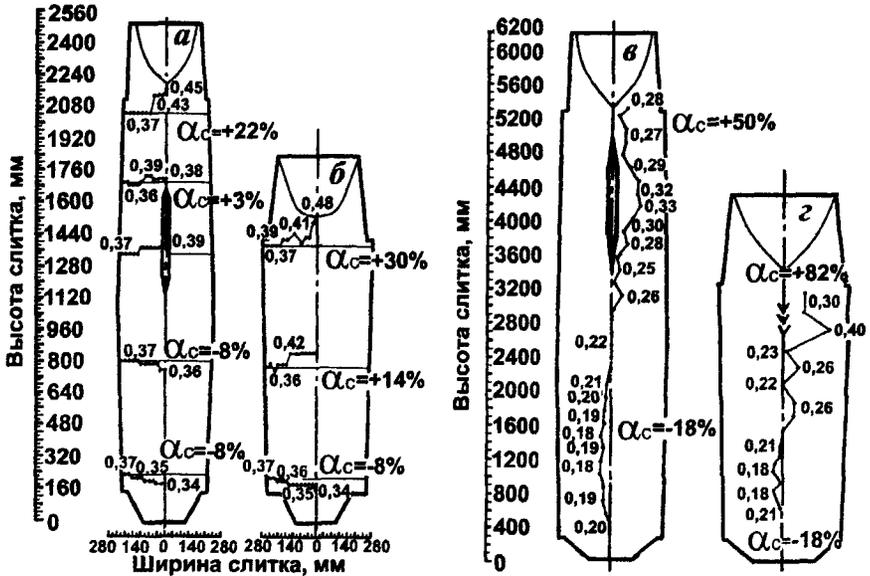
$$\alpha_c = 168,48(H/D) - 1,3643 \quad R^2 = 0,78 \quad (4)$$

$$\alpha_s = 207,17(H/D) - 1,5503 \quad R^2 = 0,65 \quad (5)$$

$$\alpha_p = 305,73(H/D) - 2,4639 \quad R^2 = 0,70 \quad (6)$$

где α_c , α_s , α_p – ликвация углерода, серы и фосфора, %
H/D – отношение высоты к среднему диаметру
 R^2 – коэффициент корреляции

Из уравнений 4 – 6 следует, что высота и диаметр его тела оказывают большое влияние на химическую неоднородность слитка. Так видно, во всех слитках различных марок стали, с увеличением параметра H/D до 4, ликвация таких сильно ликвирующих примесей, как углерод, сера, фосфор снижается.



а – слиток 2 99т сталь марки 38ХНЗМФА, б – слиток 2,88т сталь марки 38ХНЗМФА, в – слиток 50т сталь 20Г, – слиток 51т сталь 20

Рисунок 6 – Химическая неоднородность удлиненных двоянных и сравнительных прибыльных слитков обычной геометрии



◆ Ликвация С, % × Ликвация серы S, % ▲ Ликвация фосфора Р, %

Рисунок 7 – Влияние геометрии слитка (H/D) на ликвацию

Высокая химическая однородность сдвоенных слитков обусловлена тем, что зона интенсивного охлаждения, включающая в себя корку слитка и зону столбчатых кристаллов, в этих слитках, имеет большую протяженность и объем. При меньшей доле объемно затвердевающего расплава, меньшее развитие получает избирательная кристаллизация, что снижает общую ликвацию в слитке (см. таблицу 2).

Сравнение параметров зон ускоренного охлаждения показывает (см таблицу 2), что в обычных прибыльных слитках массой до 2,88т зона «нулевой» ликвации занимает около 30% объема. В удлиненных сдвоенных слитках величина этой зоны увеличивается в 1,5раза, она занимает около 45% от тела.

Таблица 2 - Зоны ликвации прибыльных и сдвоенных слитков стали 38ХНЗМФА

Масса слитка, т	H/D	S _{изл.} , см ²	$\frac{\Gamma_{изл.}^*}{M_{сл}}$, см ² /кг	Ликвация элементов, %			
				Объем зоны, %	C	S	P
1	2	3	4	5	6	7	8
Поверхностная зона слитка (интенсивного охлаждения)							
1,4	1,9**	36064	23	27	0	0	0
1,7	1,93	36064	21	31	0	0	0
2,88	2,5	49624	17	28	0	-	-
2,6	4	72128	28	42	0	0	0
2,99	4	72128	24	48	0	-	-
Центральная зона слитка							
1,4	1,9	-	-	73	8	12	27
1,7	1,93	-	-	69	20	25	37
2,88	2,5	-	-	72	38	-	-
2,6	4	-	-	58	13	24	9
2,99	4	-	-	52	30	-	-

* - отношение площади внутренней поверхности изложницы к массе металла

** - бесприбыльный слиток

Причиной увеличения доли последовательной кристаллизации в удлиненных слитках, является большая площадь внутренней поверхности изложницы, участвующей в непосредственном контакте с затвердевающим металлом. Так, к примеру, площадь внутренней поверхности изложниц сдвоенного слитка массой 2,99т в 1,5раза больше площади охлаждающей поверхности обычного прибыльного слитка массой 2,88т. При сравнении площади поверхности, участвующей в охлаждении 1кг жидкой стали (см. рисунок 8а, таблицу 2 ст 4) видно, что в удлиненных слитках величина ($\Gamma_{изл.}/M_{сл}$) примерно в 1,7раз больше, чем в обычных прибыльных слитках. Увеличение площади поверхности, участвующей в охлаждении стали, приводит к снижению химической неоднородности ~ 3раза.

Сдвоенные слитки, с повышенным H/D-4, имеют меньшую химическую неоднородность, обусловленную более протяженной зоной интенсивного охлаждения, которая затвердевает с подавлением ликвационных процессов.

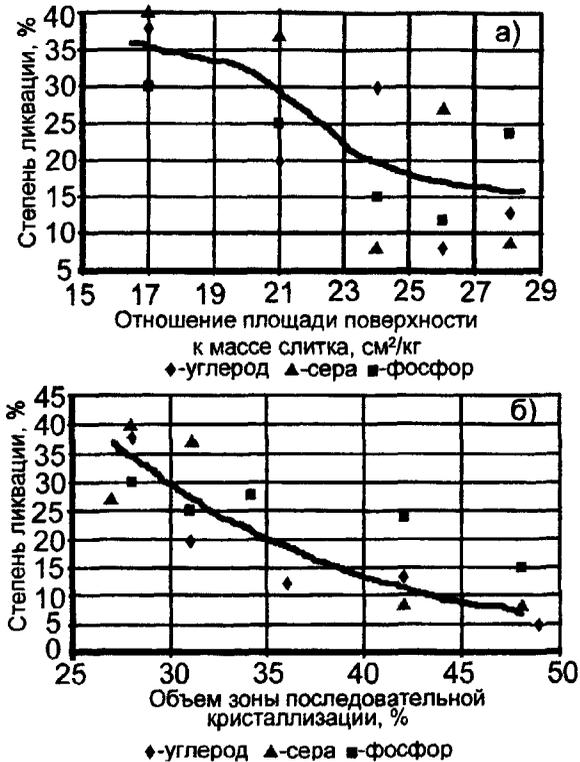


Рисунок 8 – Изменение степени ликвации в зависимости от отношения площади охлаждающей поверхности к единице массы металла (а) и объема зоны интенсивного охлаждения (б).

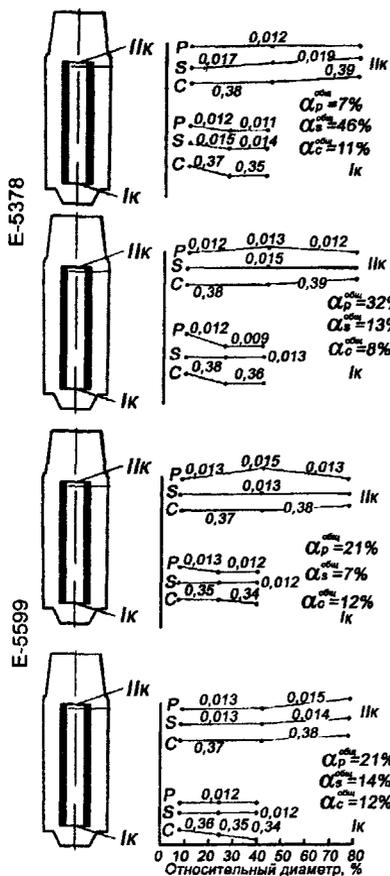
В пятой главе приведены результаты исследований химического состава и уровня механических свойств изделий из слитков стали 38ХНЗМФА обычной геометрии с отношением $H/D \sim 2$, а также заготовок, полученных из удлинённых сдвоенных слитков с $H/D \sim 4$

С учетом выявленной зависимости снижения ликвационной неоднородности, при увеличении внутренней поверхности изложницы, были отлиты слитки новой геометрии (сдвоенные прибыльные двухконусные с прямой и обратной конусностью соответственно в верхней и нижней части) массой 42,26т ($H/D \sim 4$) с последующим изготовлением из них 2-х заготовок с выходом годного 66%. Ранее эти изделия изготавливались из слитков массой 24,2т ($H/D \sim 2$) с выходом годного металла в поковку 58%

Химическая неоднородность заготовок, полученных из сдвоенных слитков выше, чем в сравнительных. Ликвация по углероду снизилась в 4раза, по сере и фосфору, в среднем, в 3раза (см. рисунок 9).

Поковки, изготовленные из опытных сдвоенных и сравнительных слитков обычной геометрии, имеют более однородный химический состав и, как следствие, одинаковые механические свойства по противоположным концам.

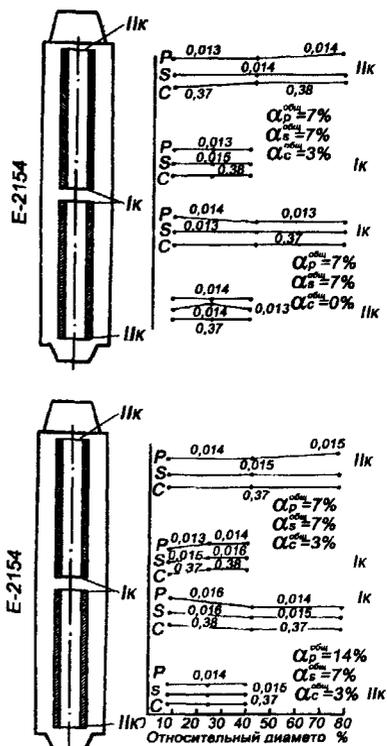
$P_k=0,012\%$
 $S_k=0,015\%$
 $C_k=0,38\%$



$P_k=0,013\%$
 $S_k=0,013\%$
 $C_k=0,35\%$

а)

$P_k=0,013\%$
 $S_k=0,014\%$
 $C_k=0,37\%$



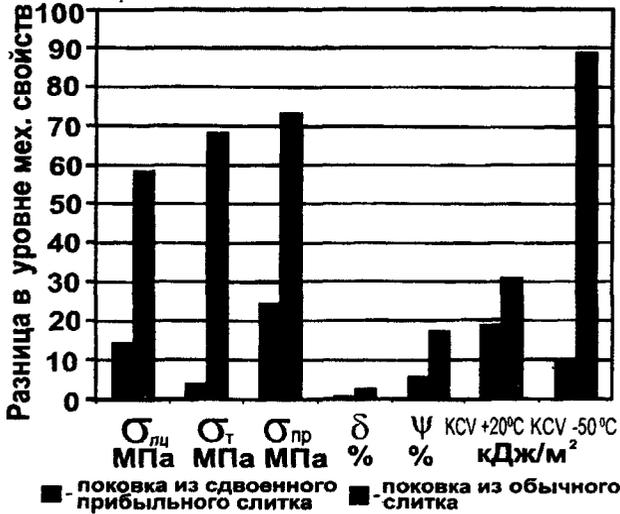
$P_k=0,014\%$
 $S_k=0,015\%$
 $C_k=0,37\%$

б)

Рисунок 9 – Химическая неоднородность заготовок из обычных (а) и сдвоенных (б) слитков

По результатам исследования готовых изделий опытной партии сдвоенные слитки были внедрены в производство для полых изделий. Внедрение сдвоенных слитков на ФГУП ПО «Баррикады» (г. Волгоград) дало экономический эффект 1 144 тыс руб (доля автора составила 25%) за счёт повышения выхода годного металла в

поковку на 8%, а также повышения химической однородности поковок и ускорения режима термической обработки



Механические свойства

Рисунок 10 – Разница уровня механических свойств на противоположных концах заготовок, полученных из двойных и обычных слитков

В шестой главе приведены результаты статистической обработки массива данных по 245 трубным поковкам (слиток 24,2т), 10 валам роторов турбогенераторов, изготовленных из стали марки 38ХНЗМФА (слиток 140т) и 31 гребному валу стали 25 (слиток 51т)

Величина ликвации, то есть разность содержания углерода между концами заготовок гребных валов, изготавливаемых из слитков одинаковой массы и разных плавок, изменяется в довольно значительных пределах (от 0,03-0,06% до 0,09-0,14%) и (от 0,05 до 0,13%).

Результаты статистического анализа показали, что на ликвацию элементов в поковке значительное влияние оказывают технологические параметры отливки слитков

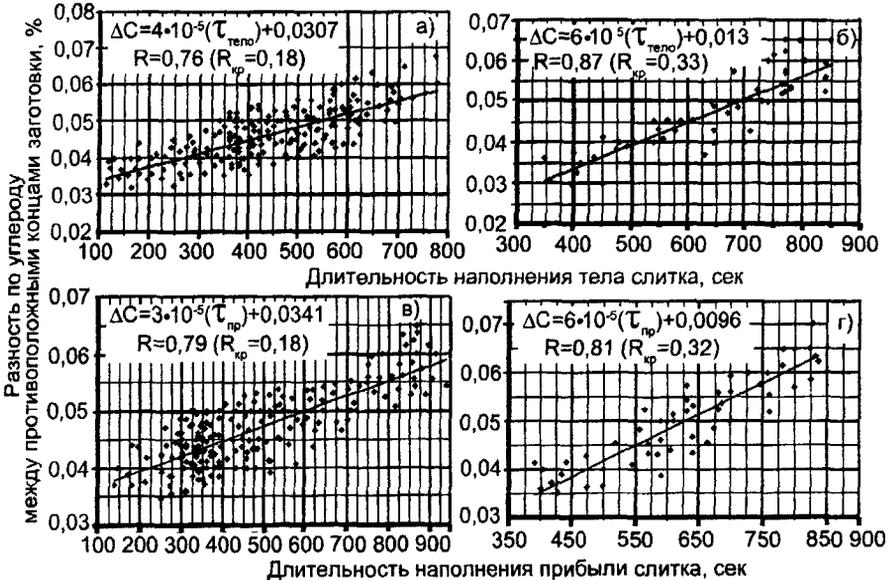
С увеличением длительности отливки тела и прибыли слитка величина ликвационной неоднородности, наследуемая поковкой, растет (см. рисунок 11) Это объясняется более длительным перемешиванием металла жидкого ядра струей расплава, что обеспечивает его перемещение на границе затвердевания с удалением обогащенного примесями слоя и, как следствие, общего увеличения содержания легкоплавких примесей в жидком ядре к концу разливки. Выведены уравнения, описывающие закономерность влияния параметров разливки слитков на ликвацию углерода в поковках (см рисунок 11).

Было отлито 6 опытных и 6 сравнительных слитков, с различными скоростями наполнения тела слитка и прибыли. На опытных заготовках разница в содержании углерода по концам составила 0,01 – 0,04% в то время, как для сравнительных заготовок указанная характеристика составила 0,04 – 0,07%. Поковки, изготовленные из опытных слитков, отлитых ускоренно, имеют меньшую разницу механических свойств (см. таблицу 3).

Получение химически однородных слитков ускоренной разливкой можно использовать только для отливки слитков предназначенных для изготовления полых поковок, например трубных заготовок. При ковке трубных заготовок осевые дефекты удаляются при прошивке в выдру или, в случае сверления осевого канала, в стружку. В случае применения ускоренной разливки для валов роторов турбогенераторов и других крупногабаритных сплошных изделий, ускоренная разливка может служить причиной возникновения осевой рыхлости.

Таблица 3 – Разница уровня механических свойств по противоположным концам в поковках из опытных и сравнительных слитков

Поковка	$\Delta\sigma_s$, МПа	$\Delta\sigma_T$, МПа	$\Delta\sigma_{пц}$, МПа	$\Delta\delta$, %	$\Delta\Psi$, %	ΔKCV_2 , кДж/м ²
Трубная поковка из опытного слитка (увеличена скорость разливки)	~25	~20	~25	~16	~18	~25
Трубная поковка из опытного слитка из сравнительного слитка (стандартная скорость разливки)	~110	~120	~100	~30	~30	~50



а, в – слиток массой 24,2т сталь 38ХНЗМФА; б, г – слиток массой 51т сталь 25
 Рисунок 11 – Влияние длительности отливки слитка на содержание углерода в противоположных концах изделия

Влияние температуры расплава на ликвацию элементов в заготовке (см. рисунок 12) изучалось с использованием результатов непрерывного измерения температуры вольфрам–рениевыми термопарами в промежуточном ковше при отливке в вакууме слитков массой 24,2 т стали 38ХНЗМФА. Температура стали в печи составляла 1630°С. Продолжительность выпуска металла и выдержка в ковше 8 и 12мин соответственно.

В 8-тонных промежуточных ковшах при отливке первого и второго слитков температура изменялась в пределах 1520–1560°C и 1560–1540°C соответственно. Среднее снижение температуры стали от выпуска (1630°C) до поступления в вакуумную камеру составило 85°C. При этом температура в начале разливки ниже, по сравнению с температурой выпуска на 110°C. Таким образом, более холодные слои металла при отливке первого слитка, попадая в промежуточный ковш, дополнительно охлаждаются и разливка в первые 2–3 минуты осуществляется при низкой температуре.

Обработка данных по ликвации углерода в изделиях, изготовленных соответственно с первого и второго слитков одной плавки (см рисунок 12) (40 шт.) показала, что в поковках, изготовленных из слитков, которые отливались первыми, ликвация углерода меньше, чем в поковках изготовленных из слитков отлитых вторыми.

Таким образом, на большом массиве производственных данных показано, что при холодной разливке ликвация снижается.



Рисунок 12 – Влияние порядкового номера отливаемого слитка на ликвацию углерода в поковке

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1) Установлено, что химическая неоднородность по оси крупных кованых заготовок из слитков стали 38ХНЗМФА массой 24,2 и 103т по углероду составляет 28% и 54% и обусловлена ликвацией элементов в стальных слитках, которая повышается в 3 – 5раз с увеличением массы с 10 до 140т.

2) Выявлено, что металл зоны отрицательной ликвации, локализуемой в конусе осаждения, с пониженным на 10 – 15% содержанием ликвирующих элементов, составляет ~ 29% от объема тела слитка и при дальнейшей ковке расковывается на 1/4 – 1/3 длины поковки.

3) Установлено, что металл с пониженным содержанием углерода с I^{II} конца поковки приводит к понижению уровня механических свойств, а при повышенном его содержании в металле II^{II} конца, росту прочностных характеристик. Различный уровень свойств на противоположных концах одного изделия осложняет организацию термической обработки заготовок для их выравнивания и их сдачу, т.к. разница температур отпуска по концам изделия достигает 150°C.

4) Впервые выявлено, что с ростом объемной доли области интенсивного охлаждения, включающей две зоны - корковую и столбчатых кристаллов, в 1,5раза, в удлинённых прибыльных слитках с $H/D \geq 4$ ликвация элементов снижается в 3раза

5) Для производства полых длинномерных поковок внедрены двоянные кузнечные прибыльные слитки массой 42,26т, имеющие большее развитие зоны последовательной кристаллизации (ускоренного охлаждения), что позволило снизить ликвационную неоднородность в изделиях в 4раза и повысить стабильность уровня механических свойств по длине в 5раз.

6) Установлено, что для увеличения химической однородности металла полых изделий, изготавливаемых из нормальных прибыльных слитков необходимо

а) производить их разливку с минимальным перегревом над температурой ликвидус, для слитков массой 24,2т стали 38ХНЗМФА, равным 60°С;

б) повысить скорость разливки тела и прибыли слитка в 1,5раза (с 1,7т/мин, до 2,5т/мин).

При этом разница в содержании углерода по концам длинномерных полых изделий уменьшилась в 2раза (с 0,10 до 0,05%), а стабильность механических свойств повысилась в 4раза.

7) Заготовки из удлинённых двоянных прибыльных слитков более технологичны для термической обработки, т.к. разница в содержании углерода не превышает 0,03%, что упрощает технологию термической обработки при назначении одинаковой температуры отпуска по концам длинномерного (10-24м) изделия

8) Внедрение удлинённых двоянных прибыльных слитков повысило выход годного металла в поковку с 58 до 66%. Экономия от внедрения составила 1 144 тыс руб

Основные положения диссертационного исследования опубликованы в следующих работах:

- 1 Слитки для крупных поковок / С.И. Жульев, А.П. Фоменко, Д.Н. Фёдоров, Д.В. Руцкий, К.Е. Титов, Е.И. Бузинов // Сталь - 2005 - №11. - С.41 - 44.
- 2 Жульев, С.И. *Исследование структуры слитка отлитого с инокуляторами* / С.И. Жульев, Д.В. Руцкий, Д.Н. Фёдоров // Современные проблемы металлургического производства: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф., Волгоград, 1-3 октября 2002г. / ВолгГТУ и др. - Волгоград, 2002 - С.184 - 187.
- 3 Жульев, С.И. *Исследование макроструктуры зоны отрицательной ликвации крупного кузнечного слитка* / С.И. Жульев, Д.Н. Фёдоров, Д.В. Руцкий // Современные проблемы металлургического производства: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф., Волгоград, 1-3 октября 2002г. / ВолгГТУ и др. - Волгоград, 2002 - С.187 - 191.
- 4 *Структура и дефекты кузнечного слитка* / С.И. Жульев, К.Е. Титов, С.Н. Чекалин, Д.В. Руцкий, Д.Н. Фёдоров, М.Е. Живов // Научно-технический прогресс в металлургии: тр. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 40-лет. Караган. металлур. ин-та, 2-3.10.03 / Карагандинский металлургический ин-т - Темиртау (Казахстан), 2003 - С.100 - 104.
- 5 *Исследование структуры слитков и заготовок* / С.И. Жульев, Д.В. Руцкий, Д.Н. Фёдоров, А.П. Фоменко, В.А. Шамрей, А.В. Мозговой // Высокие технологии в машиностроении: матер. Междунар. науч.-техн. конф., Самара, 20-22 окт. 2004г. / Самар. гос. техн. ун-т. - Самара, 2004 - С.190 - 192.
- 6 *Физическая и химическая неоднородность в удлинённом слитке* / Жульев С.И., Фёдоров Д.Н., Руцкий Д.В., Фоменко А.П., Мозговой А.В., Шамрей В.А. // Высокие технологии в машиностроении: Матер. Междунар. науч.-техн. конф., Самара 20-22 окт. 2004 / Самар. Гос. Техн. ун-т - Самара, 2004 - С.187 - 189.

- 7 Федоров, Д Н *Исследование макроструктуры «переходной зоны» инокуляторного слитка* / Д Н. Федоров, Д В Руцкий, С И Жульев // VI Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области, г. Волгоград, 13 – 16 ноября 2001г. тезисы докладов / ВолгГТУ и др. – Волгоград, 2002 – С 117 – 118
- 8 Федоров, Д Н *Исследование макроструктуры и механизма формирования зоны отрицательной ликвации крупного кузнечного слитка* / Д Н Федоров, Д В Руцкий, С И Жульев // Научные сообщения КДН: Бюллетень №11 / Волгогр клуб докторов наук – Волгоград, 2002 – С 69 – 73.
- 9 *Исследование физической и химической неоднородности удлиненного слитка* / Д Н Федоров, Д В Руцкий, А В Мозговой, С И Жульев, А П Фоменко // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России материалы 6-й всероссийской конф студентов, аспирантов и специалистов, Магнитогорск, 24-26 мая 2005г /МГТУ – Магнитогорск, 2005 - С 20
10. *Влияние химического става стали на однородность механических свойств в изделиях тяжелого машиностроения* / Д В Руцкий, Д Н Федоров, С И Жульев, А П Фоменко // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России материалы 6-й всероссийской конф студентов, аспирантов и специалистов, Магнитогорск, 24-26 мая 2005г /МГТУ – Магнитогорск, 2005 - С 17.
- 11 *Использование компьютерных программ для оптимизации оснастки в металлургическом производстве для изделий машиностроения* / Д Н Федоров Д В Руцкий, К.Е. Титов, С Н Чекалин. С.И Жульев // Научные сообщения КДН бюл (юбилейный выпуск) / Волгогр клуб докторов наук – Волгоград, 2003 –№12 – С 71 – 73.
- 12 *Совершенствование технологических параметров отливки с целью получения стабильных по механическим свойствам поковок* / С И Жульев, Д В Руцкий, Д Н Федоров, В А Шамрей, К Ю Бод // Высокие технологии в машиностроении матер Междунар. науч – техн конф., Самара, 20 – 22 окт. 2005 / Самар гос техн ун – т. – Самара, 2005. – С 219 – 221.
- 13 *Закономерности изменения химического состава металла поковок типа валов роторов турбогенераторов, изготавливаемых из слитков массой 103т стали марки 38ХНЗМФА* / С И Жульев, Д В Руцкий, Д Н Федоров, В А Шамрей, К Ю Бод // Высокие технологии в машиностроении матер Междунар науч – техн конф , Самара, 20 – 22 окт 2005 / Самар гос техн ун – т – Самара, 2005. – С 234 – 236.
- 14 *Исследование возможности повышения выхода годного кузнечного слитка для изделий тяжелого машиностроения* / С.Н Чекалин, К Е Титов, Д.В Руцкий, Д Н Федоров, Н.А Зюбан, С И Жульев // Научные сообщения КДН бюл (юбилейный выпуск) / Волгогр клуб докторов наук – Волгоград, 2003 –№12 – С 68 – 70
- 15 Федоров, Д.Н *Исследование структуры слитка отлитого с инокуляторами* / Д Н Федоров, Д.В Руцкий, С И Жульев // VII Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области, г Волгоград, 12 – 15 ноября 2002 г. тезисы докладов / Волгогр. гос технич ун – т и др – Волгоград, 2003 – С 116 – 117.
16. Руцкий, Д.В *Ликвационная неоднородность в кузнечных слитках* / Д В Руцкий, А П. Фоменко // Научные сообщения КДН: бюл. / Волгогр клуб докторов наук. – Волгоград, 2004. - №13 – С 24 – 30.
17. Титов, К.Е. *Влияние инокуляции на подавление ликвации в крупном стальном слитке* / К.Е. Титов, Д.В Руцкий, С И Жульев // VIII Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области, г Волгоград, 11 – 14 ноября 2003г. Тезисы докладов / ВолгГТУ и др. – Волгоград, 2004. – С.138 – 139.

- 18 Федоров, Д Н *Применение методов компьютерного моделирования при разработке мероприятий по увеличению выхода годного металла в изделиях машиностроения* / Д Н Федоров, Д В Руцкий, С И Жульев // VIII Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области, г Волгоград, 11 – 14 ноября 2003г. тезисы докладов / ВолГТУ и др – Волгоград, 2004 – С 143 – 145.
- 19 Фоменко, А П *Увеличение выхода годного металла на заводе «Красный октябрь»* / А П Фоменко, Д В Руцкий, В.А. Шамрей // Научные сообщения КДН бюл. / Волгогр. клуб докторов наук – Волгоград, 2004. - №13 – С 20 – 24
20. Руцкий, Д В *Влияние технологических параметров разливки на химическую неоднородность слитков и качество крупных поковок* / Д В Руцкий, С И Жульев // IX Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области, г Волгоград, 9 – 12 ноября 2004г . тезисы докладов / ВолГТУ и др. – Волгоград, 2005. – С.131 – 133.
21. *Влияние параметров отливки на развитие химической неоднородности в крупных кузнечных слитках* / С И Жульев, Д.В Руцкий, Д.Н. Федоров, А П. Фоменко, Ю М Шелухина // Научные сообщения КДН бюл / Волгогр клуб докторов наук – Волгоград, 2005. –№14 – С.11 – 15.
22. *Влияние химического состава на режим термической обработки и свойства гребных и промежуточных валов* / С.И Жульев, Д В Руцкий, Д.Н Федоров, М Е Живов, В А Шамрей // Научные сообщения КДН / Волгогр клуб докторов наук – Волгоград, 2005. – Бюллетень №14. – С.15 – 20.
23. *Закономерности изменения механических свойств в трубных поковках в зависимости от химического состава крупного слитка* / С.И Жульев, Д В Руцкий, Д Н Федоров, А.П. Фоменко, Ю М. Шелухина // Научные сообщения КДН: бюл / Волгогр клуб докторов наук – Волгоград, 2005. –№14 – С 20 – 25.
24. *Исследование неоднородности сдвоенного бесприбыльного слитка* / С.И Жульев, Д Н Федоров, А В Мозговой, Д В Руцкий // Научные сообщения КДН. бюл / Волгогр. клуб докторов наук. – Волгоград, 2005. –№14. – С.25 – 28.
- 25 *Исследование закономерностей образования усадочной раковины в удлиненных бесприбыльных слитках* / С И. Жульев, Д.Н. Федоров, А В Мозговой, Д В Руцкий // Научные сообщения КДН бюл. / Волгогр клуб докторов наук – Волгоград, 2005 –№14 – С 28 – 32.

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

В работах [3, 11, 12, 23, 24, 25], автором предложена методика исследования химической неоднородности слитков различной массы и геометрии путем отбора проб металла с поперечных изломов разорванного взрывом слитка. В работах [2, 5, 7, 8, 13] предложена методика исследования макроструктуры стальных слитков нанесением секущих, непосредственно на металл, а также предложена методика исследования параметров дендритной структуры с помощью универсальной компьютерной программы В работах [1, 4, 18, 19], автором проведено исследование дефектов крупных кузнечных слитков и изготавливаемых из них крупногабаритных поковок, определены закономерности наследования неоднородности слитков заготовкой В работах [10, 14, 15, 16], автор принимал участие в исследовании возможности повышения выхода годного кузнечного слитка, им установлены технологические параметры разливки, оказывающие первостепенное влияние на качество слитка В работах [6, 17, 20, 21, 22], автором предложены оптимальные технологические режимы и геометрические параметры слитков с целью получения качественных поковок.

Подписано в печать 9.02. 2006г. Заказ № 71. 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

1006A
3921

W-3921