

На правах рукописи

Ямпольский Олег Натанович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРОЕНИЯ
СВЕРХКРУПНЫХ СЛИТКОВ
КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ И КАЧЕСТВА
ПОКОВОК, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ НИХ**

Специальность 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2005

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор

Колпишон Эдуард Юльевич

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор

Дуб Владимир Семенович

Кандидат технических наук

Романов Олег Николаевич

Ведущая организация: ОАО «Обуховский завод»

Защита состоится «_____» _____ 2005 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.14 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбГПУ, химический корпус, ауд. 51.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «_____» _____ 2005 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.14,

доктор технических наук, профессор

Кондратьев С.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Современные технологии производства сверхкрупных, радиусом более 1000 мм, слитков (СКС) из конструкционных сталей, раскисленных углеродом в вакууме, предоставляют широкие возможности для решения технологических задач производства ответственных поковок для атомной энергетики и энергомашиностроения.

Освоение производства атомных энергетических блоков ВВЭР-1500 требует использования поковок из слитков массой до 450 тонн для патрубковой обечайки корпуса реактора и массой 360-420 тонн для роторов цилиндров низкого давления и турбогенератора.

ООО «ОМЗ-Спецсталь», ранее входившее в «Ижорские Заводы», - единственное предприятие России, имеющее необходимый опыт и оборудование для производства сверхкрупных слитков и изделий из них.

Основные проблемы, решаемые при их производстве, связаны с тем, что в последние годы резко выросли требования нормативной документации к ультразвуковому контролю поковок из крупных слитков. Если в 90^х г.г. по техническим условиям на цельнокованные заготовки валов роторов и маховиков подлежали фиксации дефекты с отражательной способностью, соответствующей плоскодонному эквивалентному отражателю диаметром 2,5 мм, то в современных ТУ отечественных заказчиков фиксируемый диаметр плоскодонного отражателя – 1,6 мм. Международные требования на подобную продукцию рекомендуют поставщикам инструкцию, утвержденную «Союзом немецких металлургов» SEP-1923. В ней фиксированный диаметр плоскодонного отражателя – 1,0 мм.

Дефекты в поковках из сверхкрупных слитков обычно располагаются по оси поковки, со стороны, откованной из верха годной части слитка, и идентифицируются как межкристаллитные кристаллизационные горячие трещины (МКГТ).

В работе рассмотрен круг взаимосвязанных задач, лежащих в основе анализа особенностей структуры СКС, свойств поковок из них, происхождения и поведения наиболее часто встречающегося вида дефектов изделий из сверхкрупных слитков - МКГТ. Проведенный анализ публикаций свидетельствует, что в существующих источниках недостаточно информации по слиткам массой более 100 т, особенно, отлитым из сталей, раскисленных углеродом под вакуумом, качеству и дефектам поковок из них.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – Изучить особенности строения сверхкрупного слитка, влияние массы СКС на качество поковок для энергомашиностроения, определить причины появления МКГТ в сверхкрупных слитках и поковках из них, предложить меры по их предотвращению и устранению, учитывая специфику современного металлургического оборудования и существующих технологий.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. В работе изучены особенности строения слитков массой до 420 т и качество поковок из них, описаны прибыли сверхкрупных слитков 136,4; 142; 147,5; 235; 290т. Подробно исследованы дефекты в поковках из СКС. Проведены термодинамические расчеты, объясняющие особенности микрорельефа МКГТ в зависимости от состава стали и условий охлаждения. Предложена схема образования МКГТ в сверхкрупных слитках и поковках, их классификация по признакам внутреннего строения. Проведено сравнение качества однотипных заготовок, произведенных из сверхкрупных слитков массой до 420 т и слитков массой 15-70 т. Показано, что при отсутствии МКГТ качество заготовок не зависит от массы слитка. Получены данные по заковыванию МКГТ, а также результаты сравнения качества обычных заготовок и однотипных, перекованных из пораженных межкристаллитными трещинами поковок.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ.

- Предлагается отказаться от принятого на российских металлургических предприятиях принципа минимизации слитка, заключающегося в том, что любую ответственную поковку необходимо изготавливать из слитка минимально возможной массы, сняв ограничение на производство нескольких заготовок из одного сверхкрупного слитка
- Перековывать заготовки с дефектами, выявленными при УЗК, протяжкой с уклоном 1,5-2,0 при пониженной температуре конца ковки осевой зоны, поскольку МКГТ являются дефектами устранимыми при свободной ковке,
- Отказаться от двуконусных прибылей и заменить их одноконусными с новой геометрией, что позволит повысить качество и снизить брак при производстве сверхкрупных слитков в ООО «ОМЗ-Спецсталь».
- Рекомендуются характеристики серного отпечатка для электронного паспорта, обеспечивающие количественную оценку распределения сульфидов.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ:

1. Результаты исследования литого и кованого металла слитков массой до 420 т.
2. Классификация МКГТ – основного вида дефектов сверхкрупных слитков по признакам строения и гипотеза образования водородных, оксидо-карбидных и сульфидных трещин.
3. Доказательства отсутствия влияния массы слитков на качество ответственных поковок из них при предупреждении или заковывании МКГТ.

ПУБЛИКАЦИИ. По материалам диссертации опубликовано семь статей. Материалы диссертации докладывались на двух межвузовских научных конференциях СПбГУ (Санкт-Петербург, 2002-2003 г.), трех международных научно-практических конференциях молодых

специалистов «Ижора-2001, 2002, 2003» (Санкт-Петербург, 2001-2003) и на научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «ММК имени Ильича» (Украина, г. Мариуполь, 2002 г).

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка использованной литературы, трех приложений. Материалы работы изложены на 177 страницах машинописного текста, содержат 50 таблиц, иллюстрированы 65 рисунками. Список литературы состоит из 130 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении раскрыта актуальность диссертационной работы, представлена научная новизна, показана практическая значимость работы.

В первой главе проведен анализ и обобщение имеющихся в литературе данных по строению слитка, макро и микроликвации. Предложен критерий оценки «сверхкрупного» слитка конструкционных марок сталей, состоящий в том, что сверхкрупным является слиток, имеющий радиус более 1000 мм, при котором градиент температуры в осевой зоне не превышает величины $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{см}$, а произведение скорости кристаллизации на градиент температуры достигает $1 \cdot 10^{-3}\text{ }^{\circ}/\text{сек}$ и практически не меняется при дальнейшем увеличении размеров слитка.

Основной упор в литературном обзоре сделан на описании межкристаллитных кристаллизационных горячих трещин в слитках. Выполненные теоретические и экспериментальные работы показывают, что дефект развивается под действием сил, тормозящих усадочные процессы. Температурный интервал образования МКГТ зависит от химического состава стали. На дефект влияют перемычки твердого металла в прибыльной части слитка, т.н. мосты.

Противоречивы данные о способности трещин залечиваться при кристаллизации и завариваться при свободной ковке. Обзор опубликованных работ также показывает, что информация о строении СКС ограничена, не изучены процессы образования и поведения межкристаллитных трещин в слитках ≥ 100 тонн, отлитых из металла, раскисленного углеродом и разлитого в вакууме, а также в поковках из них. Представляется сомнительным общее мнение о зависимости качества поковок конструкционных марок сталей от массы слитка.

Во второй главе описаны материалы и методы исследования. Материалом для работы послужили: металл лабораторных слитков, прибылей СКС, слитка массой 142 т, данные по поковкам конструкционных марок сталей из слитков массой от 15 до 420 т, произведенных по различным технологиям, в том числе с вакуумным углеродным раскислением.

Проведено статистическое исследование массива, состоящего из более чем 250 поковок роторов, изготовленных из слитков массой от 32,6 до 235 тонн. В таблице 1 представлены данные по поковкам роторов из трех марок стали в сопоставлении с массой слитков, из которых изготавливались поковки. Дефекты всегда располагаются в осевой зоне поковок. Установлено, что в поковках из крупных слитков дефекты обычно расположены в части поковки, соответствующей донной части слитка и представляют собой шпинели на основе экзогенных оксидов магния и эндогенных оксидов алюминия, а в поковках из сверхкрупных слитков – в части, соответствующей верхней половине слитка и представляют собой МКГТ. При контроле макроструктуры этот дефект имеет вид характерного «паука» - радиальных междендритных трещин или сульфидных скоплений.

Таблица 1

Расположение дефектов в забракованных по УЗК поковках роторов из сталей 25Х1М1ФА, 26ХНЗМ2ФА, 35ХНЗМФА

Масса слитка, т	Всего поковок, шт	В т.ч.не соотв. ТУ, шт	Количество поковок с дефектами в зоне			Доля поковок с дефектами в данной зоне, %		
			Верхняя шейка	Бочка	Нижняя шейка	Верхняя шейка	Бочка	Нижняя шейка
34,5	35	2	1	0	1	50,00	0,00	50,00
37,5	24	6	1	1	4	16,67	16,67	66,66
51	68	11	2	6	8	12,50	37,50	50,00
60,6	28	6	2	2	5	22,22	22,22	55,56
70	17	2	0	1	2	0,00	33,33	66,67
87	21	7	0	1	7	0,00	12,50	87,50
142	36	7	6	7	1	42,86	50,00	7,14
235	23	2	0	2	0	0,00	100,00	0,00

Изучение дефектов проводилось на трепанях, извлекаемых при высверловке из осевой части поковки. Исследовались макро и микроструктура металла с МКГТ, в работе представлены результаты наиболее наглядного метода анализа - электронной фрактографии. Установлено, что поверхность трещин может быть покрыта сульфидными включениями и на некоторых поверхностях, как включений, так и металла, имеются ступеньки роста (см. рис. 1 б, г; е); может быть свободной от включений, но с участками хрупкого внутризеренного разрушения вокруг трещины, свидетельствующего об участии водорода в процессе разрушения (см. рис. 1 в); может быть покрыта оксидами и карбидами. (см. рис. 1 д, е).

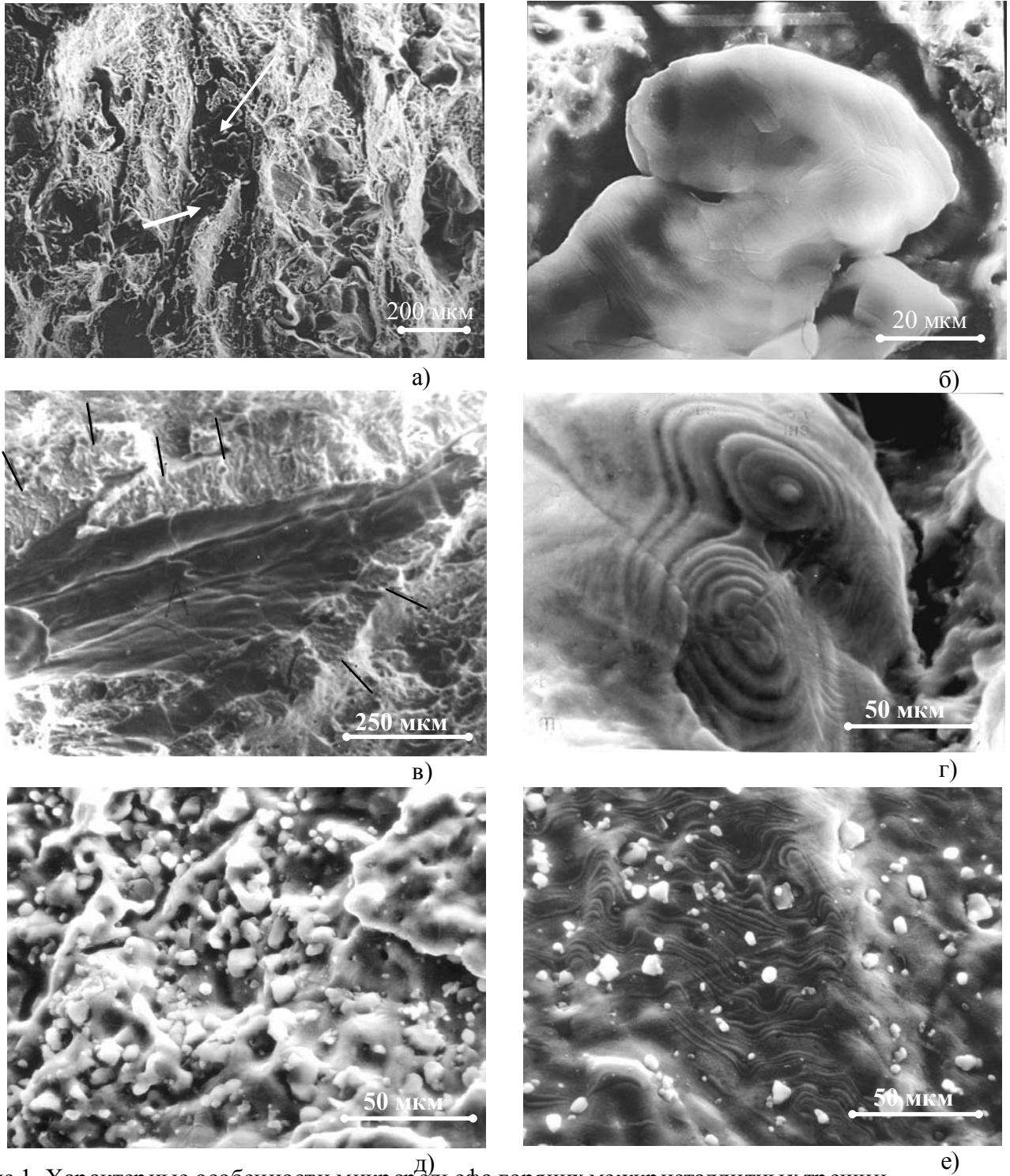


Рис.1. Характерные особенности микро рельефа горячих межкристаллитных трещин

а) ориентированное межкристаллитное разрушение с ямочным рельефом, стрелками указаны крупные сульфиды, расположенные в межкристаллитных трещинах; б) сульфид марганца при большем увеличении. На поверхности сульфида видны ступеньки роста; в) Вокруг дефекта хорошо видна хрупкая внутризёрная оторочка (обозначена стрелками); г) Ступеньки роста, которые образовались в конце затвердевания; д) Бугристый рельеф с большим количеством неметаллических включений; е) Фрагменты грани кристаллита со ступенчатым геометрическим рельефом и НВ.

Здесь также представлены методики, использованные в работе, в частности, разработанный нами метод количественной оценки максимальной степени потемнения серных отпечатков с использованием цифровой фотографии, компьютерной обработки и анализом изображения на анализаторе изображения Thixomet, что необходимо при содержании серы ниже 0,007%. Определяются следующие параметры отпечатков: S – относительная площадь потемнения серного отпечатка; n – количество серных пятен на ед. площади отпечатка. Степень потемнения S может служить критерием «годности» поковки. Также была предложена методика исследования дендритной структуры с определением межосных расстояний.

В третьей главе рассмотрены особенности строения прибылей сверхкрупных слитков, химическая неоднородность поковок из крупных и сверхкрупных слитков, а также влияние массы слитка на качество поковок. Исследовались прибыльные части слитков массой 137,4 т (ст. 10ГН2МФА, 20 ГС); 147,5 т (ст. 10ГН2МФА, 20 ГС); 142 т (ст.25ХН3МФА); 235 т (ст.26ХН3М2ФА); 290 т (ст. 15Х2НМФА). В усадочной раковине сверхкрупного слитка можно выделить следующие структурные составляющие: 1) концентрированные усадочные полости; 2) мосты – перемычки между ними, состоящие из вертикально ориентированных дендритов; 3) зону вертикально расположенных дендритов и каналов между ними под нижней (ближайшей к телу слитка) полостью. На рис. 2 а, б представлены прибыли от слитков 137,4 т из сталей 10ГН2МФА и 20 ГС. Изучение прибылей слитков 137,4 и 147,5 т, отлитых по одной технологии, показало, что в стали 20ГС они отсутствуют, а в каждой прибыли из стали 10ГН2МФА было по 2 моста. Мосты в двуконусных прибылях сверхкрупных слитков достигают толщины 600 мм.

Если сравнивать серные отпечатки однотипных прибылей из сталей 10ГН2МФА и 20 ГС, то, при одинаковом содержании серы (0,005%), зональная ликвация сильнее выражена в ст.20ГС.

Количество усадочных пор в стали 10ГН2МФА больше, чем в стали 20ГС. Размер

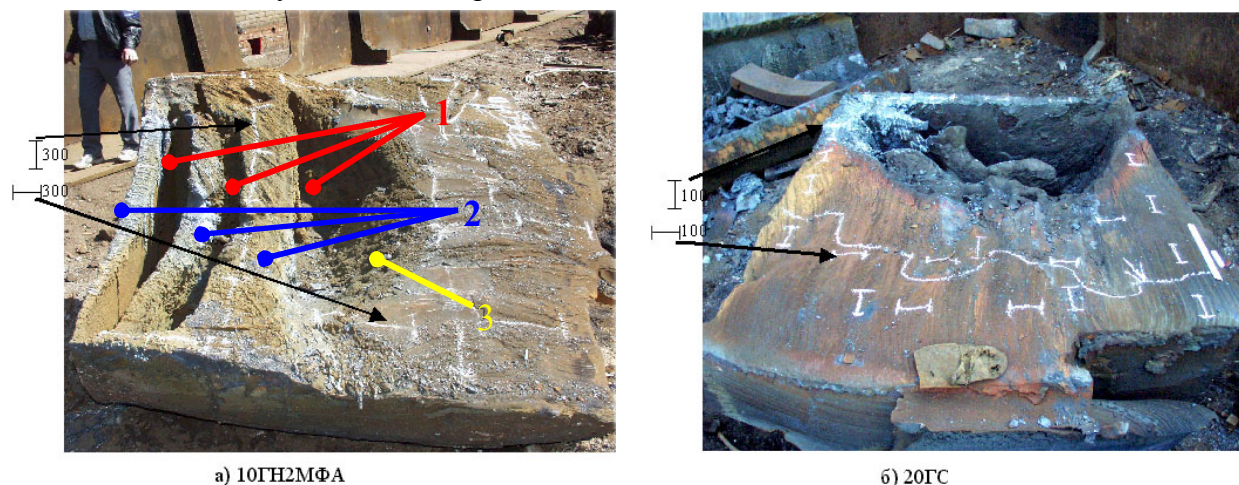


Рис. 2. Внешний вид прибылей 137,4 т слитков

усадочных пор в стали 10ГН2МФА достигает 1000 мкм, против 200 мкм в ст.20ГС. Газовых пор больше в стали 20ГС, но их размер примерно одинаковый, в среднем, около 150 мкм. Равноосные дендриты заполняют собой весь объем прибыли, образуя ориентированные по направлению действия сил гравитации сростки, разделенные каналами, из которых вытек жидкий металл. Шнуры Λ и V - образной сегрегации в сечении представляют собой скопления пор и неметаллических включений – оксисульфидов и сульфидов. Диаметр составляющих шнура, в основном, от 10 до 100 мкм. Диаметр серных шнуров в ст. 20ГС колеблется от 2 до 5,5 мм, а в стали 10ГН2МФА от 0,5 до 2,5 мм.

Состав неметаллических включений (НВ) в прибылях меняется от поверхности к центру слитка. Соотношение ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) изменяется от 0,8 до 3,6 в стали 10ГН2МФА и от 0,5 до 3,7 в стали 20ГС. Наиболее крупные (размером более 250 мкм) включения, в частности кварца, нефелина и санидина встречаются в стали 10ГН2МФА.

Вышеприведенные различия в макро и микроструктуре прибылей 20ГС и 10ГН2МФА хорошо объясняются при сопоставлении интервалов кристаллизации двух сталей. Интервал кристаллизации стали 20ГС ~28-46 $^{\circ}\text{C}$, а стали 10ГН2МФА ~16-19 $^{\circ}\text{C}$.

Обычно, газовые и усадочные поры, а также неметаллические включения располагаются на границах кристаллитов и занимают от 10 до 60% поверхности границы.

Металл прибылей со стороны слитка свободен от крупных НВ и усадочных дефектов. В зависимости от массы слитка и эффективности утепления можно использовать до 300 мм металла прибыли (~4-5 тонн) на годную поковку.

Строение прибылей изучалось в сравнении со структурой слитка 142 т из кислой мартеновской стали 25ХНЗМФА, особенно его прибыльной части. Размеры сростков разноориентированных дендритов – друз достигают 100-120 мм. Серные шнуры Λ - образной сегрегации в прибыли ориентируются почти перпендикулярно контуру усадочной раковины, затем поворачивают, плавно переходя в шнуры «V»-образной сегрегации, параллельные контуру усадочной раковины. Диаметр шнуров достигает 10 мм.

В теле слитка зона подкорковых кристаллов 15-20 мм. Зона столбчатых кристаллов ~200 мм. Все остальное сечение слитка заполнено разноориентрованными дендритами.

В прибыльной части слитка оси первого порядка разноориентированных дендритов имеют длину, в среднем, 15-20 мм. Расстояние между осями 2-го порядка 1-1,5 мм. Металлографические исследования НВ показали, что самые крупные включения находятся в верхней трети слитка. Их размер не превышает 90 мкм. Они представляют собой оксисульфиды, состоящие из оксидов кремния, алюминия и сульфидов марганца. Общее количество НВ в сталях 10ГН2МФА и 20ГС, обработанных на установке внепечного

рафинирования и вакуумирования ASEA-SKF и раскисленных кремнием и марганцем, такое же, как в кислой мартеновской стали 25ХНЗМФА, хотя резко изменился их состав. Анализ данных по отечественным и импортным слиткам показал, что нет выраженной связи между количеством оксидной фазы НВ и массой слитка. Содержание и состав оксидов определяется технологией раскисления стали, вакуумное углеродное раскисление уменьшает общее количество оксидов в 1,3-2 раза.

Представлены результаты изучения неравномерности химического состава и макроструктуры поковок из крупных и сверхкрупных слитков, поскольку разрезка слитков массой более 142 т не производилась и изучение поковок из них является общепринятым способом исследования химической неоднородности и дефектов соответствующих слитков. При отливке СКС, для уменьшения степени зональной ликвации используют метод последовательной заливки ковшей металла, имеющего меньшее исходное содержание ликвирующих элементов (С, Мо и др.), чем в предыдущем ковше. В таблице 2 приведены данные по неравномерности химического состава из слитков массой 21 - 425 т производства трех заводов: Ижорского («ОМЗ-Спецсталь»), Kobe Steel и Japan Steel, из которых на ОАО «Ижорские заводы» изготавливались роторы энергомашин.

Таблица 2

Степень неравномерности состава (%) в зависимости от массы слитка

Масса слитка, т	Изготовитель	Элемент				
		С	Мn	Р	S	Мо
21*	ИЗ**	8	15	40	43	6
34,5*	ИЗ	24	5	33	100	15
51*	ИЗ	11	5	20	0	10
70*	ИЗ	16	13	50	125	8
142*	ИЗ	7	6	40	33	6
225	ИЗ	43	8	80	67	14
235*	ИЗ	14	5	25	38	7
360	ИЗ	45	8	42	57	20
375	Japan Steel	40	13	38	60	25
420	ИЗ	30	11	50	62	16
425	Kobe Steel	27	9	28	33	20

* - слитки отлиты в 2003-2004 г.

**ИЗ – Ижорские заводы («ОМЗ-Спецсталь»)

Степень неравномерности химического состава этих слитков, рассчитывалась по формуле:

$$\frac{Conc_{max} - Conc_{min}}{Conc_{min}} * 100\%$$

где $Conc_{max}$ - максимальная концентрация элемента в слитке (поковке), %








$Conc_{min}$ - минимальная концентрация элемента в слитке (поковке), %.

Из таблицы 2 видно, что для сверхкрупных слитков не наблюдается корреляции между массой слитка и степенью неравномерности его химического состава. Неравномерность химического состава зависит от технологии отливки сверхкрупного слитка, применяемой на конкретном предприятии, а, следовательно, может колебаться в широких пределах.

Связь серных отпечатков с МКГТ нуждается в количественном описании. В таблице 3 представлены результаты оценки серных отпечатков поковок, изготовленных из слитков разной массы, некоторые из них были поражены МКГТ. Серные отпечатки для всех представленных в таблице поковок оцениваются 1 баллом шкалы НКМЗ №1. При сравнении поковок из слитков 142 и 235 т по предложенной методике видно, что у забракованных по УЗК поковок степень потемнения (S) в центре существенно выше, чем у годных.

Таблица 3

Фрагменты и результаты обработки серных отпечатков (1 см²) слитков массой 34,5-420 т

Характеристика	Балл по 1 шкале НКМЗ	центр	центр		Результаты УЗК
			S, %	n, шт	
34,5, 26ХНЗМ2ФА, маховик, верхняя шейка	1		2	21	УД
51 т, Р2МА, ротор, верхняя шейка	1		27	154	УД
142 т, пок. 900588, ротор, верхняя шейка	1		11	54	УД
142 т, пок. 900594, ротор, верхняя шейка	1		18	128	НЕУД
235 т, пок. 707413, ротор, верхняя шейка	1		9	84	УД
235 т, пок. 707472 ротор, верхняя шейка	1		9,5	110	УД
235т, 707139, ротор, верхняя шейка	1		17	85	НЕУД

S – относительная площадь потемнения на серном отпечатке

n – количество серных пятен на ед. площади отпечатка

Результаты производственных экспериментов по перековке дефектных заготовок позволили получить данные о качестве поковок, изготовленных из СКС, и сравнить их с аналогичными поковками, изготавливаемыми из слитков меньшей массы (15-60 тонн). Кроме того, в силу изменения структуры заказов, из слитка 420 т (промежуточная заготовка

диаметром 2000 мм не имела внутренних дефектов), было изготовлено 11 заготовок – роторы, рабочие колеса, диски газовой турбины, которые обычно изготавливают из слитков 50-70 тонн. Таким образом, был получен уникальный материал, позволяющий сравнить качество одинаковых поковок, изготовленных из обычных (крупных) и сверхкрупных слитков после термической обработки в равных сечениях. Механические свойства поковок, приведенные в таблице 4 показывают, что качество поковок из СКС равноценно качеству поковок из слитков 70т.

Таблица 4

Механические свойства дисков газовых турбин.

Масса слитка, т	Механические свойства							T ₅₀ , °C
	Маркировка	min/max	σ _в , МПа	σ ₀₂ , МПа	δ, %	ψ, %	KCV ₂ , кДж/м ²	
70	Б	min	1000	902	16	65	1137	-70
		max	1080	960	21	69	1597	-60
	М	min	960	853	13	39,5	1029	-60
		max	1080	960	19,6	68	1510	-60
420	Б	min	1000	870	16	60	1140	-70
		max	1070	940	19,5	68	1300	-60
	М	min	1010	890	15,5	27	960	-70
		max	1080	940	18,5	64	1220	-30
ТУ 108.11.847-87, сталь 26ХНЗМ2ФА				840-960	не менее			≤-30
				13	44	540		

В четвертой главе рассматриваются причины образования дефектов, обнаруживаемых при ультразвуковом контроле в поковках из крупных и сверхкрупных слитков.

МКГТ частично залечиваются обогащенным серой металлом из верхних горизонтов слитка при направленной кристаллизации. Это показывают результаты УЗК поковок из 360 и 235 тонных слитков, контроль их макроструктуры и «пауки» серных отпечатков (рис.3). Характер распределения серы в поковках указывает на первоначальное наличие несплошностей в виде трещин в осевой зоне слитка. Но в поковке из слитка 360 т ультразвуковой контроль и анализ макроструктуры дефектов не обнаружили, а в поковке из слитка 235 т были обнаружены дефекты типа МКГТ. Диаметр поковок одинаков (1800 мм), а диаметр слитка 360 т в 1,2 раз больше, чем слитка 235 т, т.е. степень укова поковки из этого слитка при одинаковой технологииковки в 1,5 раза больше.

Доказательством влияния работы прибыли на образование трещин является то, что все 7 роторов, откованных по трем технологиям из слитков 142 т, отлитых в изложницу с нарушенной теплоизоляцией двухконусной прибыли, оказались дефектными. Остальные 28 заготовок, откованные из 142 т слитков с нормально работающей прибылью, дефектов не имели. Причину этого явления объясняют проведенные нами теплофизические расчеты.

Показано, что под влиянием консольного выступа кожуха и грузового кольца, предотвращающего всплывание двухконусной надставки, а также утраты теплоизоляционного слоя прибыли – шамота легковеса, в подприбыльной части слитка образуется мост, вызывающий образование МКГТ. Влияние технологииковки на результаты ультразвукового контроля доказывается тем, что 52 из 55 поковок роторов диаметром 1800 мм из 235 т слитков, откованные с подстуживанием, дефектов не имели, а 3, откованные без подстуживания, имели дефекты.

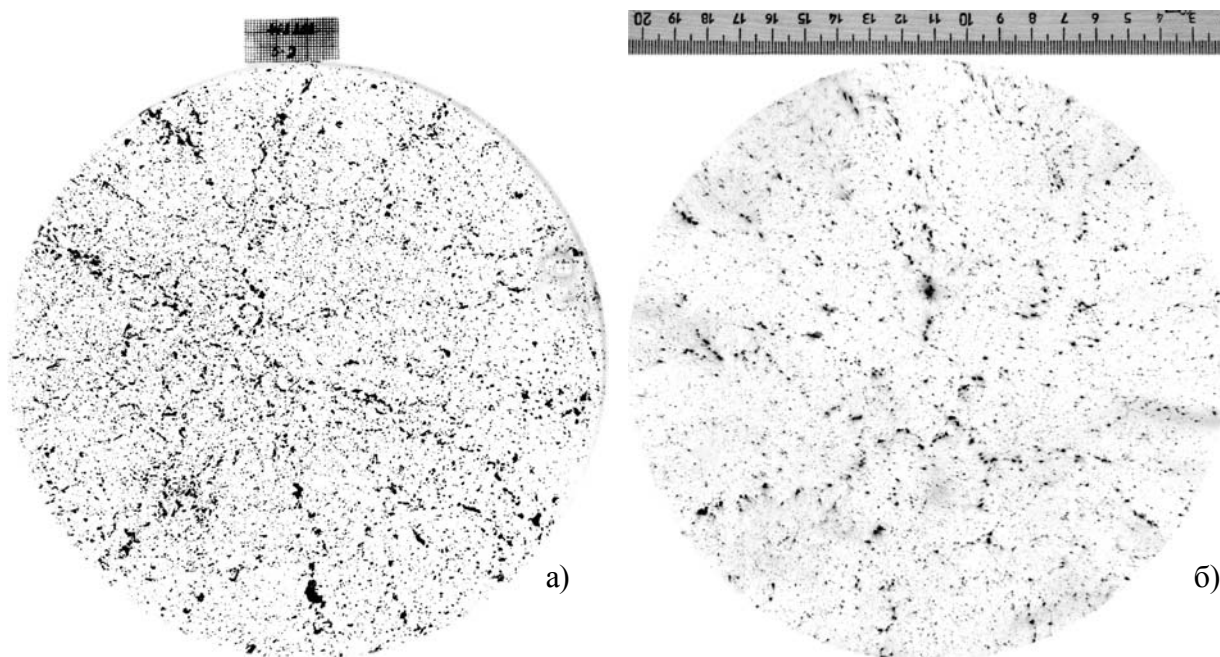


Рис. 3. Серные отпечатки осевых трепанов роторов из слитков: а) 360 т б) 235 т

Характер поверхности трещин (рис.1) указывает на их взаимодействие с газовой фазой, поэтому были выполнены расчеты возможности образования газовых пузырей в слитках от 15 кг до 142 т стали, содержащей $Si \leq 0,1 \%$, $Al \leq 0,01 \%$ с вакуумной обработкой и без нее.

Расчеты показали, что в зависимости от ферростатического и атмосферного давлений глубина расположения пузырей изменяется от верха прибыли до $1/3$ высоты тела слитка 142 т. При поддержании зеркала металла в жидком состоянии после снятия вакуума, атмосферное давление препятствует образованию пузырей в теле слитка и его влияние сильнее, чем изменение ферростатического давления за счет увеличения высоты прибыли на 1 – 1,5 м. Образование твердой корки снимает влияние атмосферного давления, а образование мостов уменьшает ферростатическое давление, способствуя образованию пузырей в теле слитка, являющихся стадией образования МКГТ.

При реальном содержании водорода 0,0002-0,0003%, кислорода $\leq 0,005\%$ и азота 0,003%-0,004% их суммарного давления недостаточно для разрыва затвердевающего металла и

превращения пузырей в МКГТ без воздействия термоусадочных деформаций. Выполнены расчеты деформаций и напряжений в зависимости от химического состава стали, дефектности границ кристаллитов и перепада температур в зоне трещинообразования, показана возможность технологического воздействия на трещинообразование.

Для проверки результатов расчетов проведены лабораторные эксперименты по отливке слитков из нераскисленной стали типа 25ХНЗМФА. Разрезка лабораторных слитков массой 15 кг подтвердила, что повышение содержания кислорода с 0,0009 до 0,0017 % приводит к перемещению зоны пузырей с верхних в глубинные горизонты слитка. На таких же слитках был проведен эксперимент по проверке возможности заковывания газовых пузырей. При укове 1,5 дефекты полностью завариваются и не выявляются УЗК и макротравлением.

Аналогичный эксперимент был выполнен на металле трепана, извлеченного из пораженной МКГТ поковки (слиток 235 т, сталь 26ХНЗМ2ФА). Была откована поковка со ступенями, соответствующими уковам 2, 4, 6. Поковка была подвергнута моделирующей термообработке, разрезана и исследована. Установлено, что уже при укове 2 трещины в поковке не обнаруживались. Этот уков обеспечивает максимальный уровень и изотропность свойств продольных и поперечных образцов. При уковах 4,6 возникает существенная анизотропия свойств, связанная с формированием цепочек неметаллических включений вдоль направления вытяжки. Анализ результатов вышеописанных производственных экспериментов подтверждает эти выводы.

Для понимания процессов взаимодействия газовой фазы с поверхностью незаварившейся трещины проведена термодинамическая оценка возможности образования оксидов и карбидов Cr, Mn, Fe, V, Mo в системе газов CO-H₂ при температурах от 1100 до 600°С. Расчеты велись в системе FactSage при равной концентрации реагентов и суммарном давлении газов=1 атм. Они показывают (таблица 5), что образование оксидов V, Cr и Mn, карбидов Cr, Mo, V вполне вероятно при реальных температурах охлаждения слитка и его нагрева под ковку.

Таблица 5

Возможность образования оксидов и карбидов в системе металл+CO+H₂

T, °C	Cr _{карб}	Fe _{карб}	Mn _{карб}	V _{карб}	Mo _{карб}	Cr _{окс}	Fe _{окс}	Mn _{окс}	V _{окс}	Mo _{окс}
1100	+	-	-	+	-	+	-	+	+	-
1000	+	-	-	+	+	+	-	+	+	-
900	-	-	-	+	+	+	-	+	+	-
800	-	-	-	-	+	+	-	+	+	-
700	-	-	-	-	+	+	-	+	+	-
600	-	-	-	-	+	+	-	+	+	-

«+» - химическое соединение присутствует в системе;

«-» - химическое соединение отсутствует в системе

Вышеописанные характерные признаки МКГТ могут быть результатом трех различных схем образования, по нашему мнению, протекающих в четыре стадии (рис.4).

Стадия 1. В интервале ликвидус-солидус, ближе к концу затвердевания, когда доля твердой фазы (f_s) приближается к 0,85, в осевой зоне слитка образуется сомкнутый скелет (сетка) из осей дендритов, заполненный жидким металлом. По температурной шкале - это верхняя граница эффективного интервала кристаллизации.

Стадия 2. $0,85 \leq f_s \leq 0,9$. На этой стадии происходит разделение по признаку пропитываемости локальной зоны затвердевания горячим металлом из верхних горизонтов слитка. Если в данный горизонт слитка поступают порции жидкого металла из верхних горизонтов, тогда поры заполняются обогащенным ликвирующими примесями жидким металлом (схема 1). В случае если пропитки не происходит, образуются дефекты объема – усадочные поры, которые начинают заполняться газом (схемы 2 и 3). Процесс развивается до тех пор, пока из-за образования моста начинается противодействие объемной усадке. Появляются микронадрывы в незатвердевших пограничных областях.

Стадия 3. $0,9 \leq f_s \leq 1$. Граница локального солидуса. В схеме 1 прекратилась пропитка жидкостью, произошло затвердевание эвтектической жидкости в трещине. Образовались сульфиды. В схемах 2 и 3 термоусадочные деформации, давление газов и соответствующие напряжения разорвали часть перемычек.

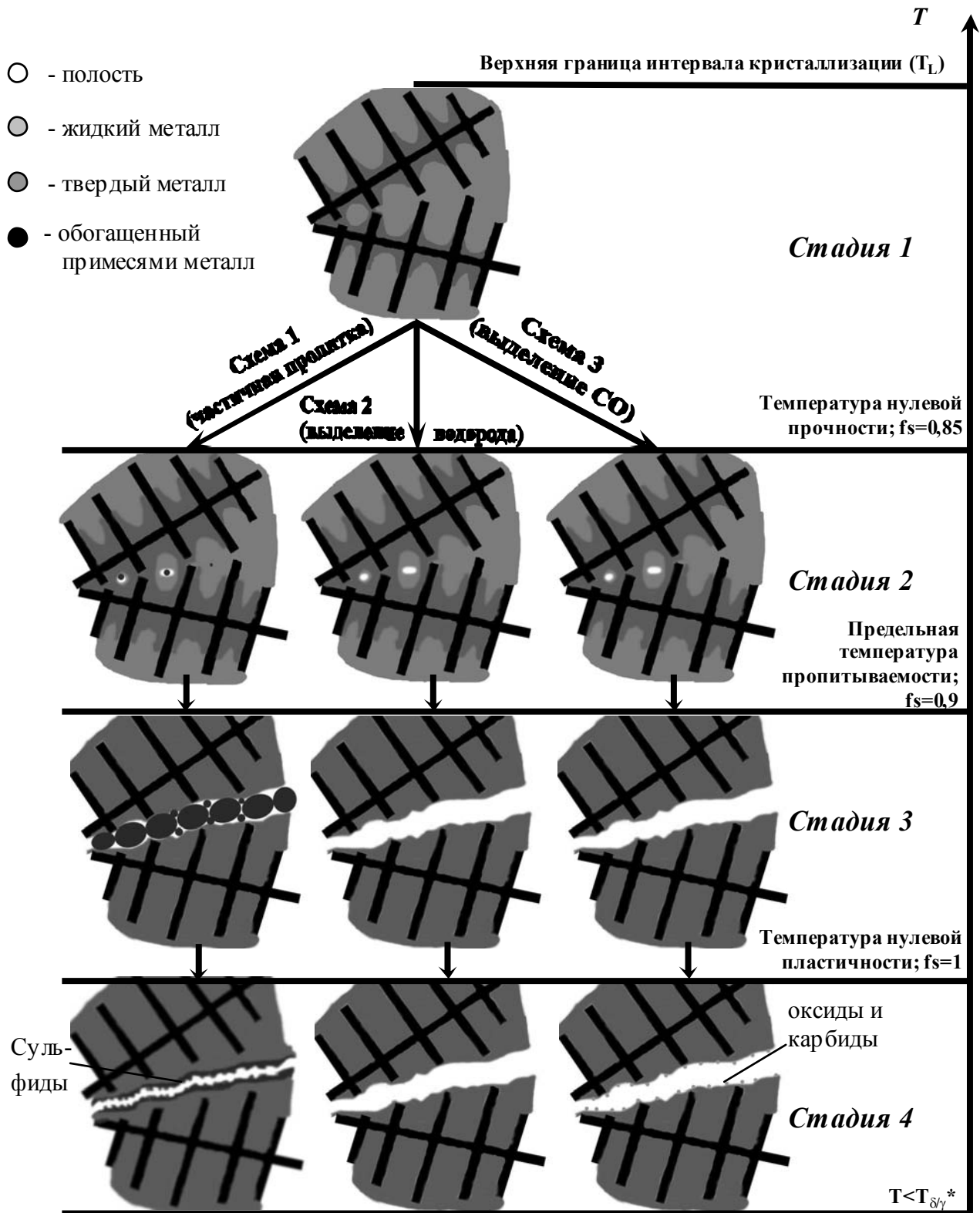
Стадия 4. В процессе охлаждения в твердом состоянии, после температурных выдержек, деформации, под действием термических, фазовых и усадочных напряжений сформировался дефект - межкристаллитная горячая кристаллизационная трещина (МКГТ).

Схема 1. Усадка в твердом металле привела к разрыву ослабленного НВ металла междендритных границ, находящегося между друзами, когда величина деформаций превысила критическую величину, зависящую от содержания серы и вида сульфидов. Поверхность МКГТ декорирована сульфидами. На поверхности сульфидов и свободных поверхностях трещины – ступеньки роста (рис.1 б, г).

Схема 2. Молекулярный водород, преимущественно выделяющийся в трещину, не вступает в химическую реакцию с компонентами стали, но создает внутреннее давление, которое способствует развитию трещин при термических и фазовых напряжениях. Атомарный водород охрупчивает окрестности дефекта, на поверхности трещин этот процесс отмечается хрупкими внутризеренными оторочками. Поверхность трещины чистая, рельеф ступенчатый (рис.1 в).

Схема 3. Монооксид углерода – реакционно-способный газ для некоторых элементов поверхности трещины, т.к. при охлаждении СО диссоциирует с образованием CO_2 и твердого углерода. Ступенчатая поверхность дефекта декорирована оксидами и карбидами,

образующимися при взаимодействии продуктов реакции Белла-Будуара с хромом, молибденом, ванадием, марганцем (рис.1 д, е).



* $T_{\delta\gamma}$ – Температура δ - γ превращения, при которой в системе наблюдаются максимальные деформации.

Рис.4. Схемы и последовательность образования межкристаллитных кристаллизационных горячих трещин

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ.

1. В результате исследования СКС в литом и ковном состоянии описаны особенности их структуры, химической неоднородности, состава и содержания неметаллических включений, уровень механических свойств в зависимости от массы слитка. Выполнены расчеты и эксперименты, описывающие процесс трещинообразования в зависимости от термоусадочных деформаций, состава стали и газов, выделяющихся при затвердевании стали. Установлено, что при направленной кристаллизации слитка, МКГТ залечиваются металлом из вышерасположенных горизонтов. Предложено классифицировать МКГТ как сульфидные, водородные и оксидо-карбидные.
2. Установлено, что основной причиной образования МКГТ является неэффективная работа прибыли, связанная с недостатками ее конструкции, дефектностью теплоизоляционного слоя футеровки и поздней засыпкой теплоизоляционной смеси. При отливке СКС 142-420 т необходимо отказаться от двухконусных надставок с грузовыми кольцами, заменив их одноконусными надставками новой геометрии.
3. Показано, что химический состав, технология раскисления и десульфурации стали должны обеспечивать получение сульфидных включений II типа, предотвращать образование пленочных сульфидов, особенно, имеющих температуру плавления ниже температуры конца ковки осевой зоны слитка.
4. Для заковывания трещин предложено избегать выдержки слитков в интервале температур 600-800 °С, понизить температуру конца ковки осевой зоны, внедрить на ответственных изделиях метод ковки через промежуточную заготовку, оптимизировать технологию перекова дефектных заготовок.
5. Установлено, что бездефектные поковки конструкционных марок сталей из современного сверхкрупного слитка по всем показателям качества (дендритная и зональная неоднородность, уровень механических свойств, результаты ультразвукового контроля) не уступают поковкам из слитков массой менее 100 тонн.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **Ямпольский, О.Н.** Влияние технологии выплавки и разлива стали на качество заготовок для роторов [Текст] /О.Н. Ямпольский [и др.] //Электromеталлургия.-2001.-№8.- С.39-41
2. **Ямпольский, О.Н.** Влияние факторов выплавки и разлива на результат ультразвукового контроля заготовок роторов паровых и газовых турбин [Текст]./О.Н. Ямпольский// Труды II международной научно-практической конференции молодых специалистов «Ижора-2001»/ ОАО «Ижорские заводы» - Санкт-Петербург,- 2001.-С. 8-10
3. **Ямпольский, О.Н.** Влияние интервала кристаллизации стали на особенности строения прибыли. [Текст]./О.Н. Ямпольский// Труды III международной научно-практической конференции молодых специалистов «Ижора-2002»/ ОАО «Ижорские заводы» - Санкт-Петербург, 2002.-С. 62-63
4. **Ямпольский, О.Н.** Газовые пузыри как одна из возможных причин дефектов в вакуумированной стали. [Текст]./О.Н. Ямпольский// Труды IV международной научно-практической конференции молодых специалистов «Ижора-2003 / ОАО «Ижорские заводы» - Санкт-Петербург, 2003.-С. 14-17
5. О качестве крупных поковок роторной стали [Текст] /О.Н. Ямпольский [и др.] //Электromеталлургия.-2003.-№4.-С.16-19
6. **Ямпольский, О.Н.** Газовые пузыри одна из возможных причин дефектов в вакуумированной стали. // О.Н. Ямпольский, Э.Ю. Колпишон/ XXXII неделя науки СПбГПУ. Материалы межвузовской научной конференции. Часть III/ Изд-во СПбГПУ – Санкт-Петербург, 2004 г. - С. 161-164.
7. Особенности поверхностного микрорельефа горячих межкристаллитных трещин в поковках из крупных слитков хромоникельмолибденванадиевой стали [Текст] / О.Н. Ямпольский [и др.] //Электromеталлургия.-2004.-№9.-С.26-30.