

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
ДОНЕЦКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

ЧЕРНОБАЕВА Татьяна Викторовна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПУЛЬСАЦИОННОГО
ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА МАКРОДЕФЕКТЫ
И ЗАГРЯЗНЕННОСТЬ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ
ВКЛЮЧЕНИЯМИ КРУПНЫХ СЛИТКОВ И ОТЛИВОК**

Специальность 05.16.01 — «Металловедение
и термическая обработка металлов»

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ДОНЕЦК — 1993



00778918 (1)

Робота виконана в
політехнічному інституті

Научного керівника

ческих наук, професор

Бичков Д.Б.

кандидат технічних наук, доцент

Смирнов А.Н.

Офіційні опоненти: член-кореспондент АН України, доктор
технічних наук, професор *Повняк Л.А.*; кандидат технічних наук,
доцент *Лейбриг Н.В.*

Ведуче підприємство: концерн "Азовмаш" (г.Маріуполь).

Захист состоится "24."...*Ч.Ю.Н.Я.*.....1993 г. в ауд. 363
пятого учебного корпуса в ... часов на заседании специализирован-
ного совета Д 068.20.01 в Донецком ордена Трудового Красного Знамени
политехническом институте.

Адрес: 340000, г.Донецк, ул.Артема, 58.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донецкого
политехнического института.

Автореферат введено в печать "19".....*мае*.....1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
доктор технических наук

С.Л.Ярошавский

Подп. в печать *13.05.93* Формат 60×84^{1/16}. Бумага *типографская* офсетная печать.
Усл. печ. л. *0,93* . Усл. кр.-отт. *4,116* . Уч.-изд. л. *0,93* . Тираж 100 экз.
Заказ № *4-113*

Донецкий политехнический институт, 340000, Донецк, ул. Артема, 58.

ДМПП, 340050, Донецк, ул. Артема, 96

В. Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из основных тенденций развития современной металлургии и машиностроения является ужесточение требований к качеству металлопродукции за счет повышения эксплуатационных характеристик стали. В настоящее время особую актуальность приобретают технологические приемы, обеспечивающие рост показателей механических и физических свойств в рамках уже используемых марок сталей.

Важным условием, обеспечивающим требуемые свойства металлопродукции, является получение слитков и отливок высокого качества, которое во многом связывается с подавлением дефектов усадочного и ликвационного характера. Для повышения качества стали обычно используются разнообразные технологические приемы, сущность которых заключается в регламентации характеристик исходных шихтовых материалов, с одной стороны, и широком использовании методов внепечной обработки стали в ковше или в ходе технологических переливов, с другой стороны. Однако при производстве крупных слитков и отливок эффективность этих методов весьма ограничена в силу того, что развитие усадочных и ликвационных дефектов, в первую очередь, зависит от условий затвердевания и массы металла в форме.

Следовательно, разработка и внедрение методов, позволяющих управлять процессами затвердевания и обеспечивающих повышение физической и химической однородности слитков и отливок, является актуальной проблемой, решение которой обеспечит повышение качества и надежности различных деталей большой массы, входящих в машины и агрегаты ответственного назначения.

Цель работы. Разработка основных принципов управления качеством крупных слитков и отливок в процессе затвердевания с помощью методов принудительного перемешивания жидкой фазы и выбор рациональных режимов применительно к пульсационному перемешиванию.

Научная новизна. Изучена возможность управления качеством крупных слитков и отливок с помощью методов перемешивания металла в процессе затвердевания для предотвращения образования и подавления дефектов кристаллизационного и ликвационного происхождения. Проведена комплексная количественная оценка развития химической неоднородности на макроуровне в металле крупных слитков и отливок и установлена закономерность влияния пульсационного перемешивания на образование макросегрегаций. Разработана методика оценки загрязненности стали неметаллическими включениями, основанная на

стереологической реконструкции их распределения. Исследовано влияние пульсационного перемешивания на морфологию, состав и распределение неметаллических включений в кузнечном слитке и зависящие от этого физико-механические свойства. Реализован в промышленных условиях метод пульсационного перемешивания жидкой фазы затвердевающего металла слитков и отливок.

На защиту выносятся:

результаты комплексной количественной оценки макродефектов кузнечных слитков и прибылей крупных сталей, жидкая фаза которых подвергалась пульсационному перемешиванию при затвердевании;

положения о закономерностях влияния перемешивания жидкой фазы затвердевающего металла как способа управления кристаллизационными и ликвационными процессами в крупных слитках и отливках;

методика количественной оценки чистоты стали с помощью стереологической реконструкции распределения неметаллических включений;

результаты исследования влияния пульсационного перемешивания на загрязненность стали неметаллическими включениями.

Практическая ценность. Предложены принципы управления качеством слитков и отливок с использованием пульсационного воздействия на жидкую фазу в зависимости от назначения изделия. Технология внедрена в сталелитейном цехе Краматорского завода "Энергомашспецсталь". Использование технологии обеспечило уменьшение себестоимости отливки в среднем на 20,25 руб./т (в ценах 1990г.).

Разработана методика оценки чистоты стали, позволяющая осуществлять полный статистический анализ распределения в ней неметаллических включений. Методика имеет особое практическое значение с точки зрения сравнительного анализа загрязненности стали, так как позволяет учитывать мелкие неметаллические включения, выявление которых с помощью оптического микроскопа затруднено.

Апробация работы. Материалы диссертации доложены и обсуждены на 8 научно-технических конференциях различного уровня, в том числе - отраслевой молодежной научно-технической конференции "Научно-технический прогресс в производстве ферросплавов и электростали" (Челябинск, 1988), межреспубликанской научно-технической конференции "Передовой опыт производства стали, ее внепечной обработки, разливы в слитки и получения кузнечных заготовок" (Волгоград, 1989), VI научно-технической конференции молодых ученых и специалистов "Прогрессивные литейные технологии и материалы" (Киев, 1989), XI Всесоюзной конференции по проблемам слитка "Процессы разливы, модифицирования и кристаллизации стали и сплавов" (Волгоград, 1990), II Всесоюзной научно-технической конференции "Совершенствование металлургических технологий в машиностроении" (Волгоград, 1991).

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 7

научных статьях и 6 авторских свидетельств.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, списка литературы (136 наименований), 2 приложений. Работа изложена на 100 страницах текста, содержит 49 рисунков и 20 таблиц.

Первая глава посвящена анализу современных методов повышения качества металлопродукции на стадии производства кузнечных слитков и крупных стальных отливок. Отмечено, что в основе происхождения и развития дефектов макроструктуры лежит массопаренос в объеме слитка или заготовки, вызывающий сегрегацию, термическую усадку и термическую конвекцию. Степень развития дефектов строения литых сплавов определяется структурой фронта кристаллизации и процессами, обуславливающими формирование кристаллического строения слитка или отливки.

Неоднородность дендритного строения, возникающая в процессе затвердевания сплава в двухфазной зоне служит источником развития "а" и "v"-сегрегаций, которые могут быть в результате преобразования конвективными потоками в шнуры объемов обогащенной ликвитами жидкости. С процессом формирования слитка, его макроструктурой и дефектами тесно связано распределение неметаллических включений. Неметаллические включения могут быть основной причиной резкого изменения механических свойств металла. При этом особое внимание уделено понятию чистоты стали, подразумевающему вероятность стойкости стали к разрушению, обусловленному химическим составом, морфологией, размерами и распределением включений.

Выполненный анализ существующих методов качественной и количественной оценки загрязненности стали неметаллическими включениями показал, что большинство из них носят условный характер и имеют ограниченные возможности. Показано, что для получения объективной информации необходимо исследовать значительный объем параметров, которые характеризовали бы неметаллические включения, в том числе химический состав, морфологию, расположение, количественные показатели (размеры, количество и т.д.) и пр. Получение количественных показателей распределения неметаллических включений в значительной степени связывается со статистическими методами. Получаемая при этом статистическая кривая дает информацию о распределении неметаллических включений по размерам. Вместе с тем известные методы статистической оценки не учитывают те неметаллические включения, которые не фиксируются при подсчете из-за разрешающей способности микроскопа, что затрудняет оценку точности проводимых исследований особенно в условиях сопоставительного анализа.

Анализ источников возникновения дефектов и путей их предотвращения показывает, что в общем случае в качестве главных управляющих факторов можно принять направление и интенсивность конвективных потоков, характер перемещения и количество твердой фазы в жидкой ванне слитка и их взаимодействие между собой. В этом плане резервом повышения качества слитков и отливок в рамках существующего сталеплавильного производства может быть применение методов внепечной обработки жидкой стали и наложения продолжительного воздействия в ходе затвердевания. При этом основной эффект может быть достигнут за счет рафинирования металла и модифицирования неметаллических включений.

Специфические особенности затвердевания кузнечных слитков и крупных отливок (большая масса металла, продолжительное затвердевание, строгая регламентация отдельных видов дефектов и пр.) в целом достаточно серьезно ограничивают выбор методов перемешивания расплава. Так, например, применение высокоэффективного метода электромагнитного перемешивания, широко используемого для повышения качества непрерывнолитых заготовок, представляется весьма проблематичным в силу ограниченной глубины проникновения электромагнитного перемешивания в расплав. Вместе с тем, с точки зрения организации направленных циркуляционных потоков расплава в жидкой ванне слитка весьма эффективным может быть метод пульсационного перемешивания, заключающийся в периодическом вытеснении порций металла из погружаемой в прибыль огнеупорной трубы. При размещении огнеупорной трубы вдоль вертикальной оси слитка может быть достигнуто подавление термогравитационной конвекции без вовлечения в перемешивание верхнего слоя металла в прибыли.

На момент начала работы основные исследования по пульсационному перемешиванию металлургических расплавов были направлены на рациональную организацию непосредственного процесса перемешивания и оптимизацию основных рабочих параметров агрегатов. В связи с отсутствием комплексных металлургических исследований по влиянию пульсационного перемешивания на качество слитка в настоящей работе были поставлены следующие задачи:

изучение влияния пульсационного перемешивания при затвердевании на образование усадочных дефектов и формирование макроструктуры крупных слитков и отливок;

оценка развития химической неоднородности на макроуровне и установление закономерности влияния внешнего воздействия на образование макросегрегаций в кузнечных слитках;

разработка методики оценки загрязненности стали неметаллическими включениями и изучение влияния пульсационного воздействия на распределение включений в слитке;

промышленное освоение и внедрение результатов исследований.

Во второй главе обоснованы выбор объекта и методики проведения исследований, включающие оценки макродефектов, макроструктуры и загрязненности стали неметаллическими включениями.

Исследования выполнены на слитках массой до 5 т из низколегированных марок сталей (22К, 20ХН, 34ХНЗМ, 40ХН) и крупных многоприбыльных отливках с массой прибылей примерно равной массе прибылей опытных слитков. Такой выбор объектов исследований объясняется возможностью обеспечения сравнительного анализа влияния пульсационного перемешивания на процессы затвердевания больших масс металла, имеющих различные геометрические размеры. Помимо этого принципиальным отличием затвердевания слитков и корпусных отливок является отсутствие массобмена между прибылью и телом в последнем случае.

Предварительную оценку влияния пульсационного перемешивания на формирование слитков осуществили с помощью прозрачной физической модели (в качестве модельного вещества использовался тиосульфат натрия). Сравнение процесса затвердевания модельных слитков, затвердевших без воздействия и с дополнительным пульсационным перемешиванием, позволило установить, что главной особенностью пульсационного воздействия является формирование: а) стабильных циркуляционных потоков расплава, движущихся вертикально вниз вдоль оси слитка и вертикально вверх вдоль фронта затвердевания; б) зоны пульсирующей турбулентности, ограниченной нисходящими и восходящими потоками; в) зоны замкнутых циркуляционных потоков, расположенной выше нижнего среза погружаемой трубы. Кроме того, характерной особенностью формирования пульсирующей струи является вовлечение металла из зон, прилегающих непосредственно к нижнему срезу трубы.

Проведенные модельные эксперименты позволили качественно изучить процесс затвердевания слитков при наложении пульсационного воздействия и показали, что для выполнения корректных металлографических исследований необходимо иметь количественную информацию о расположении и протяженности зон металла, затвердевшего в ходе воздействия.

Для оценки влияния пульсационного воздействия на ход затвердевания сплавов и формирование структуры слитков и отливок принят комплексный подход, учитывающий процессы, происходящие как на

макро-, так и на микроуровне.

Изучение макродефектов кузнечных слитков и крупных стальных отливок проводили по следующей схеме: а) усадочные дефекты (глубина проникновения и угол раскрытия усадочной раковины, плотность металла из различных зон слитков и отливок); б) ликвационные характеристики (глубина проникновения и угол раскрытия конуса подсадочной ликвации; глубина проникновения, диаметр, длина и угол раскрытия шнуров "V"-сегрегации; размещение относительно зон затвердевания слитка шнуров "A"-сегрегации, их длина, диаметр, угол наклона и количество; высота, угол раскрытия и объем конуса отрицательной ликвации; распределение ликвидирующих элементов и газов на основе данных химического анализа и математических расчетов); в) макроструктура выявление и измерение протяженности различных структурных зон в заготовке, угол наклона столбчатых кристаллов относительно горизонтальной плоскости, средняя площадь макрозерна, величина дендритного параметра).

Для оценки изменения загрязненности стали в работе предложена методика стереологической реконструкции распределения неметаллических включений. Методика основана на гипотезе о логнормальном распределении эквивалентных диаметров неметаллических включений. При этом конечная информация о чистоте стали представляется в виде кривой распределения диаметров включений, полученных на основании статистической оценки. Для построения кривой распределения вся выявленная совокупность включений (отдельно сульфиды и оксиды) делится по размерам на интервалы. Функция плотности логнормального распределения описывается выражением:

$$V_{\tau_i}(x) = \frac{1}{\sigma_{\ln x} \sqrt{2\pi}} * \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{\ln x_i - \mu}{\sigma_{\ln x}} \right]^2 \right\}, \quad (I)$$

где μ и $\sigma_{\ln x}$ - соответственно среднее арифметическое значение и среднеквадратичное отклонение логарифмов для центров интервалов. Проверка соответствия исходных эмпирических данных логнормальному закону распределения осуществляется по критериям χ^2 и λ .

Последующие преобразования заключаются в стереологической реконструкции исходных данных с учетом результатов химического анализа на содержание серы или кислорода в исследуемой пробе. Графическая схема получения дополненной кривой логнормального распределения размеров неметаллических включений и блок-схема алгоритма расширения исходной кривой представлены на рис.1 и 2 соответственно.

скорости кристаллизации v слитка (с 0,15...0,23 см/мин до 0,20...0,33 см/мин).

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о положительном влиянии пульсационного перемешивания на формирование слитка. При этом наблюдается смещение расположения теплового центра в зависимости от места приложения пульсационного воздействия, что подтверждается изменением угла наклона осей столбчатых кристаллов. Кроме того, уменьшение протяженности зоны столбчатых кристаллов и отсутствие шнуров внецентральной ликвации в зоне, затвердевшей непосредственно в процессе обработки, следует связывать с восходящими конвективными потоками вдоль фронта затвердевания, которые формируются в результате принудительного перемешивания. Фактически эти потоки способствуют также выносу обогащенного ликватами и примесями металла в прибыль слитка.

Следовательно, принудительное перемешивание жидкой фазы слитков можно рассматривать как фактор, управляющий качеством слитка при соответствующей регламентации интенсивности перемешивания, направленности циркуляционных потоков и длительности воздействия.

Четвертая глава посвящена анализу влияния пульсационного перемешивания на загрязненность стали неметаллическими включениями. Отмечено, что образование оксидов и сульфидов разделено во времени. Большинство оксидов формируется при легировании, раскислении и рафинировании стали. Поэтому распределение и морфология оксидов могут служить основой для представления о развитии массопереноса в слитке и, как следствие, коагуляции включений. Сульфиды, главным образом, выделяются между ветвями дендритов в ходе затвердевания слитков. Вследствие этого по данным качественной и количественной оценки сульфидов и оксисульфидов можно судить о динамике затвердевания слитка.

Предварительную оценку морфологии и характера расположения неметаллических включений проводили на образцах из прибыльных частей слитков и отливок. При этом качественный и количественный состав включений в слитках определяли с помощью рентгеноспектрального микроанализатора "Самбак", а в отливках - на электронном микроскопе "Jeo1 733 - JСХА". Установлено, что, как в опытных, так и в сравнительных прибылях слитков и отливок кислород и сера в основном связаны в оксисульфиды. Отличительной особенностью включений в опытных прибылях было то, что на сульфидной подложке ($mFeS \cdot nFeS$) расположены не один, а несколько мелких оксидов (SiO_2 или Al_2O_3). Такие конгломераты, видимо, являются результатом коагуляции включений вследствие

турбулизации конвективных потоков, вызываемых перемешиванием.

Для расширения информации о влиянии перемешивания на морфологию включений на образцах металла из слитков С и Д (сталь 20ХН) производился качественный и количественный анализ состава включений.

Отличительной особенностью расположения оксидов в опытном слитке было их повышенное содержание в головной части. Наиболее характерными являлись, как и в прибылях опытных отливок, оксисульфидные конгломераты, служащие доказательством положительного влияния пульсационного перемешивания на укрупнение оксидов и их вынос циркуляционными потоками в прибыль.

Сульфиды в опытном слитке выделены в виде обособленных частиц и изредка в виде скопления. Качественный и количественный анализ состава включений выявил в них более высокое содержание марганца (на 2,1...4,0%), чем в сульфидах сравнительного слитка. Оценка морфологии сульфидов, проведенная в соответствии с классификациями К.Симса и И.Ито, показала, что в металле, затвердевшем в ходе пульсационного перемешивания, практически полностью отсутствуют сульфиды II типа (колониальные) и появляются сульфиды III типа (многогранные), отсутствующие в образцах металла из сравнительного слитка. Результаты оценки морфологии сульфидов и выполненного статистического анализа позволили установить, что с повышением скорости затвердевания стали (0,23...0,30 см/мин - в опытном слитке и 0,18...0,25 см/мин - в сравнительном) число неколониальных сульфидов I, III и X типов возрастает, а число колониальных сульфидов II типа уменьшается. Такое изменение морфологии неметаллических включений в опытном металле свидетельствует об увеличении их пластичности, что повышает пластичность стали в целом.

Определение пластичности стали из исследуемых слитков С и Д проводили на пластометре фирмы "SETARAM" при температурах начала (1280°C), окончания горячего деформирования (950°C) и промежуточной (1100°C). Для всего интервала температур количество оборотов до момента разрушения у образцов из опытного слитка было большим, чем в сравнительном. В целом же пластичность стали из опытного слитка в области температур горячего деформирования повышается на 20...40% и 15...20% для образцов, отобранных из зон, затвердевших в процессе пульсационного воздействия и по окончании обработки соответственно.

Количественную оценку загрязненности кузнечных слитков неметаллическими включениями осуществляли с использованием методики стереологической реконструкции логнормального распределения размеров

включений на микроскопе "Neophot - 34" при увеличении $300\times$. Основное отличие полученных для всех исследуемых зон кузнечных слитков кривых логнормального распределения размеров оксидов состояло в смещении расположения кривых в опытном слитке в сторону увеличения числа мелких включений (2...3 мкм) и уменьшения числа крупных включений (15 мкм и более). Особенно это характерно для верхней границы конуса осадения, где крупные оксиды не обнаружены. В целом в опытном слитке Д соотношение между мелкими и крупными оксидами возросло в зоне перемешивания в среднем в 2,9 раза за счет уменьшения доли крупных оксидов. Однако в подприбыльной части возросла массовая доля крупных включений, главным образом за счет окисьюльфидных конгломератов.

Количественной интегральной оценкой данных по определению объемной доли включений с помощью результатов дополненного распределения получены диаграммы распределения оксидов в продольных сечениях слитков. Показано, что в целом распределение оксидов в опытном слитке согласуется с движением основных потоков, направленных вверх и во внутрь прибыльной части слитка. При этом заметная часть оксидов выносится потоками в прибыль слитка.

Одновременно с оксидами осуществляли анализ неравномерности распределения сульфидов и окисьюльфидов. Соотношение мелких и крупных сульфидов в обработанном слитке в зоне перемешивания увеличилось в среднем в 2,5 раза. Причиной этому служит увеличение доли мелких сульфидов в зоне слитка, затвердевшей в процессе пульсационного воздействия. Таким образом, увеличение скорости затвердевания слитка и повышение дисперсности дендритной структуры приводит к измельчению сульфидов, выделяющихся между ветвями дендритов. Очевидно, при увеличении длительности пульсационного воздействия можно ожидать равномерного распределения сульфидов в теле слитка с преобладанием мелкой фракции.

Тот факт, что с точки зрения размеров и распределения неметаллических включений загрязненность сульфидами опытного слитка ниже, чем сравнительного, подтверждается и результатами подсчета объемной доли сульфидов в зонах, затвердевших до начала, в процессе и по окончании пульсационного воздействия. Диаграммы, характеризующие распределение сульфидов в продольных сечениях исследуемых слитков в целом соответствуют и дополняют серые отпечатки с этих слитков, а также подтверждает гипотезу о влиянии пульсационного перемешивания жидкой фазы на вынос серы в прибыльную часть слитков.

Таким образом, результаты исследования влияния пульсационного

перемешивания на морфологию и распределение неметаллических включений показали, что такая обработка обеспечивает более равномерное распределение в теле слитка оксидов и сульфидов, благоприятствует коагуляции и выносу в прибыль оксисульфидов при уменьшении размеров и количества сульфидов в теле слитка, а также изменяет морфологию сульфидов и их количественный состав. Следовательно, наложение пульсационного перемешивания при затверждении обеспечивает повышение качества слитка с точки зрения загрязненности стали неметаллическими включениями.

В пятой главе рассмотрены перспективы применения методов принудительного перемешивания жидкой фазы для управления качеством слитков и отливок. На основании обобщения результатов выполненных исследований показано, что принудительное перемешивание расплава целесообразно организовывать направленными циркуляционными потоками, препятствующими развитию термогравитационной конвекции и обеспечивающими вынос вредных примесей в прибыль. Дополнительный эффект может быть достигнут за счет локального перемешивания прибыльных частей слитков или отливок, что связано с изменением тепловых условий их затверждения. Более того, при создании определенных условий для формирования большого количества частиц твердой фазы в расплаве (обрушение твердой корочки, формирующейся у поверхности расплава в гиббиде) и формирования циркуляционных потоков в прибыли представляется возможным смещение теплового центра в более высокие горизонты. Следовательно, использование принудительного перемешивания может обеспечить подавление усадочных и ликвационных дефектов, а также повышение физической и химической однородности металла.

Основные положения по управлению качеством крупных слитков и отливок с помощью метода пульсационного перемешивания реализованы в промышленных условиях Краматорского завода "Энергомашспецсталь". При внедрении технологии пульсационной обработки жидкой фазы прибылей отливок основной целью было уменьшение массы прибылей за счет снижения глубины проникновения усадочной раковины и усадочной пористости и увеличение химической однородности металла в нижней части прибылей (в месте отделения). Для прибыльных отливок типа "корпус турбины", имеющих от 4 до 8 прибылей массой от 4,5 до 7,5 т было достигнуто уменьшение глубины проникновения усадочной раковины на 8...11% (относительно высоты прибыли) при уменьшении в среднем на 15...20% абсолютной глубины залегания подусадочной пористости и

ликвации. Промышленная реализация разработанной технологии обеспечила снижение расхода металла на 36...54 кг/т отливки в зависимости от ее типа.

Применительно к крупным кузнечным слиткам в промышленных условиях отработывалась технология повышения качества за счет подавления дефектов типа "внецентренная ликвация" при обеспечении повышения выхода годной, путем уменьшения глубины проникновения усадочных дефектов и брака по горячим трещинам при ковке. Технология отработывалась на кузнечных слитках различной массы (до 51 т) и в настоящее время рекомендована для промышленного внедрения. Как показали промышленные исследования технология пульсационной обработки жидкой фазы слитков может быть особенно перспективной при производстве слитков для поковок типа "валок". При этом за счет обработки представляется возможным смещение шнуров внецентренной ликвации внутрь слитка, что в последствии предотвращает выход этих шнуров на поверхность готового изделия и, в конечном счете, повышает его стойкость. При расширении промышленного применения технологии пульсационной обработки конкурентноспособность ей также может обеспечить возможность локального управления процессом формирования отдельных зон слитков и отливок за счет рационального выбора режимов воздействия.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. На основании выполненного анализа методов производстве крупных слитков и стальных отливок показаны преимущества метода пульсационного перемешивания для обработки их жидкой фазы, так как в этом случае в жидкой ванне формируются стабильные циркуляционные потоки, движущиеся вертикально вниз вдоль оси слитка и затем вертикально вверх вдоль фронта затвердевания.

2. Изучено влияние пульсационного воздействия на промышленных кузнечных слитках массой до 51 т и крупных отливках массой до 92 т. Выбранные режимы, учитывающие длительность воздействия, а также место приложения пульсаций и глубину погружения пульсационной трубы, обеспечивали варьирование интенсивности перемешивания как всего объема жидкой фазы, так и отдельных зон слитков и отливок. Показано, что на результаты обработки одновременно влияет значительное количество факторов, что позволило предложить системный комплексный подход для оценки качества слитков на макро- и микроуровне.

3. Выполнен анализ известных методов качественной оценки

загрязненности стали неметаллическими включениями. Показано, что для получения количественных значений целесообразно использовать методы статистической оценки.

Предложена методика оценки загрязненности стали путем стереологической реконструкции распределения неметаллических включений, позволяющая получать статистическую кривую распределения с учетом невидимой (из-за разрешающей способности оптического микроскопа) части включений. В основу методики положена гипотеза о логверфимическом нормальном распределении неметаллических включений по размерам.

4. В результате исследований, выполненных на промышленных кузнечных слитках, установлено, что при пульсационном перемешивании помимо уменьшения глубины проникновения усадочной раковины во всех опытных слитках отмечено увеличение угла наклона осей столбчатых кристаллов к горизонту, что является подтверждением смещения теплового центра слитков в более высокие горизонты.

5. На основании оценки данных макроструктуры и химического анализа сделано предположение, что восходящие конвективные потоки способствуют выносу вредных примесей в прибыль слитка. Этот факт, в совокупности с возможностью смещения теплового центра слитка позволяет рассматривать пульсационное перемешивание как фактор, обеспечивающий управление качеством слитка при затверждении.

6. Выполнен сравнительный анализ влияния пульсационного перемешивания на морфологию неметаллических включений. В прибыли опытных слитков наблюдается повышенное количество оксидов и оксисульфидных конгломератов, а в теле слитков - практически полное исчезновение колоннальных сульфидов (тип II) и увеличение многогранных сульфидов (тип III), что повышает пластичность металла. Повышение пластичности металла опытного слитка в области температур горячего деформирования подтверждено измерениями на пластометре фирмы "BETARAM". Установлено, что пластичность повышается на 20...40% и 15...30% для образцов, отобранных из зон слитка, затвердевших соответственно в процессе обработки и после ее окончания.

7. При использовании методики стереологической реконструкции распределения неметаллических включений получены дивграммы распределения оксидов и сульфидов в продольном сечении, позволяющие проследить влияние пульсационного перемешивания на загрязненность различных зон слитка. В целом пульсационная обработка обеспечивает более равномерное распределение оксидов и сульфидов в объеме слитка, а также благоприятствует коагуляции и выносу в прибыль оксидов и

окисью сульфидов и уменьшает в среднем размеры сульфидов в теле слитка.

8. На основании результатов выполненных исследований рассмотрены перспективы применения метода пульсационного перемешивания для повышения качества слитков и отливок. В промышленных условиях Краматорского завода "Энергомашспецсталь" отработаны технологические рекомендации по обработке жидкой фазы крупных слитков и отливок. Использование технологии пульсационной обработки обеспечило снижение себестоимости отливок в среднем на 20,25 руб./т (в ценах 1990г.) в зависимости от их типа.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Смирнов А.Н., Бычков Ю.Б., Чернобаева Т.В., Пильгук С.В. Качество кузнечных слитков из низколегированной стали, подвергнутых пульсационной обработке при затвердении/ МетММ.1991, № 7, С.21-22.

2. Смирнов А.Н., Пильгук С.В., Неделькович Л., Чернобаева Т.В. О влиянии пульсационного перемешивания на формирование макроструктуры и макронодородности стального слитка/ Изв. вузов. Черная металлургия. 1991, № 8, С.12-15.

3. Смирнов А.Н., Чернобаева Т.В., Пильгук С.В., Штрбачки Ж. Особенности влияния пульсационного перемешивания на природу и характер распределения неметаллических включений в кузнечном слитке/ Изв. вузов. Черная металлургия. 1992, № 6, С.52-55.

4. Смирнов А.Н., Чернобаева Т.В., Пильгук С.В., Прохоренко Е.Д. Металлографическая оценка качества слитков при пульсационном перемешивании жидкой фазы/ Переходной опыт производства стали, ее выпечной обработки, разливки в слитки и получения кузнечных заготовок: Межреспубликанская научно-техн. конф. - Волгоград, 1989. - С.102-103.

5. Смирнов А.Н., Пильгук С.В., Чернобаева Т.В. и др. Исследование влияния пульсационного перемешивания при затвердении на макроструктуру кузнечных слитков/ Процессы разливки, модифицирования и кристаллизации стали и сплавов: XI Всесоюзная конф. по проблемам слитка. Ч.I. - Волгоград, 1990. - С.14-17.

6. Смирнов А.Н., Чернобаева Т.В., Пильгук С.В., Орлов И.А. Исследование качества металла кузнечных слитков, подвергнутых пульсационной обработке при затвердении/ Совершенствование металлургических технологий в машиностроении: II Всесоюзная научно-техн. конф. с участием иностр. специалистов. - Волгоград, 1991. - С.151-152.

7. Смирнов А.Н., Чернобаева Т.В., Пильгук С.В. Исследование влияния пульсационного перемешивания при затвердении на качество кузнечных слитков/ Создание и освоение экологически чистых ресурсосберегающих технологий в черной металлургии: Всесоюзная научно-техн. конф. молодых ученых, инженеров и рабочих. - Донецк, 1991. - С.45.

Кроме того, технологические приемы, обеспечивающие оптимальные результаты перемешивания жидкой фазы слитков и отливок с помощью пульсационного и вибрационного воздействия, защищены авторскими свидетельствами: № 1342592, 1468652, 1470446, 1509175, 1574350, 1671407.

1342592

AB 27.452