

УДК 536.421.1+532.546:621.746

Недопекин Ф.В. – д.т.н., проф., Донецкий национальный университет (ДонНУ)

Мелихов В.М. – к.т.н. с.н.с., ДонНУ

Белоусов В.В. – д.т.н., проф., ДонНУ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОМПОЗИТНЫХ СЛИТКОВ

В работе представлено решение нелинейных дифференциальных уравнений теплопереноса и гидродинамики, которое реализовывалось при помощи разностных методов. Вычислительный эксперимент по исследованию процесса формирования композитного слитка позволил получить следующую информацию: поля температуры, доли твердой фазы и поля скоростей в расплаве; изменение температуры в слитке и во внутреннем холодильнике; размеры кристаллов в многослойном и армированном слитках. Получено удовлетворительное согласование с результатами физического эксперимента и натурных экспериментов других авторов.

Ключевые слова: теплофизические процессы, теплоперенос, гидродинамика, многослойный слиток, армированный слиток, численное моделирование, затвердевание, кристаллизация.

Введение

Развитие современной техники предъявляет высокие требования к качеству и свойствам литых изделий, вызывает необходимость создания высоких технологий разлива и кристаллизации стальных сплавов. Одним из основных направлений решения поставленных задач является получение изделий, которые состоят из нескольких слоев сталей с различными теплофизическими свойствами, т.е. композитных слитков – многослойных и армированных с внутренним холодильником. Вместе с тем, до сих пор недостаточно изучен вопрос количественной взаимосвязи гидродинамических и теплофизических параметров формирования композитных стальных слитков и влияние их на структуру и физико-механические характеристики литого металла.

Цель настоящей статьи: определение основных закономерностей развития теплофизических и гидродинамических процессов, в том числе определение поля температуры, скорости расплава, твердой фазы при различных режимах формирования композитного слитка; определение адекватности математической модели формирования композит-

ных слитков; расчет макроструктуры стали многослойного и армированного слитков; исследование процесса затвердевания армированного слитка, а также нагревание и плавление внутреннего холодильника.

Постановка задачи

Решение задачи осуществлялось в двумерной постановке для стального квадратного слитка, уширенного кверху [1 – 3]. Ввиду симметрии исследуемой системы слиток – изложница область исследования выбиралась как половина продольного сечения композитного слитка.

Моделировался процесс разливки 11-тонного композитного слитка уширенного кверху с прибыльной надставкой. Формирование многослойного слитка (МС) осуществлялось в три этапа.

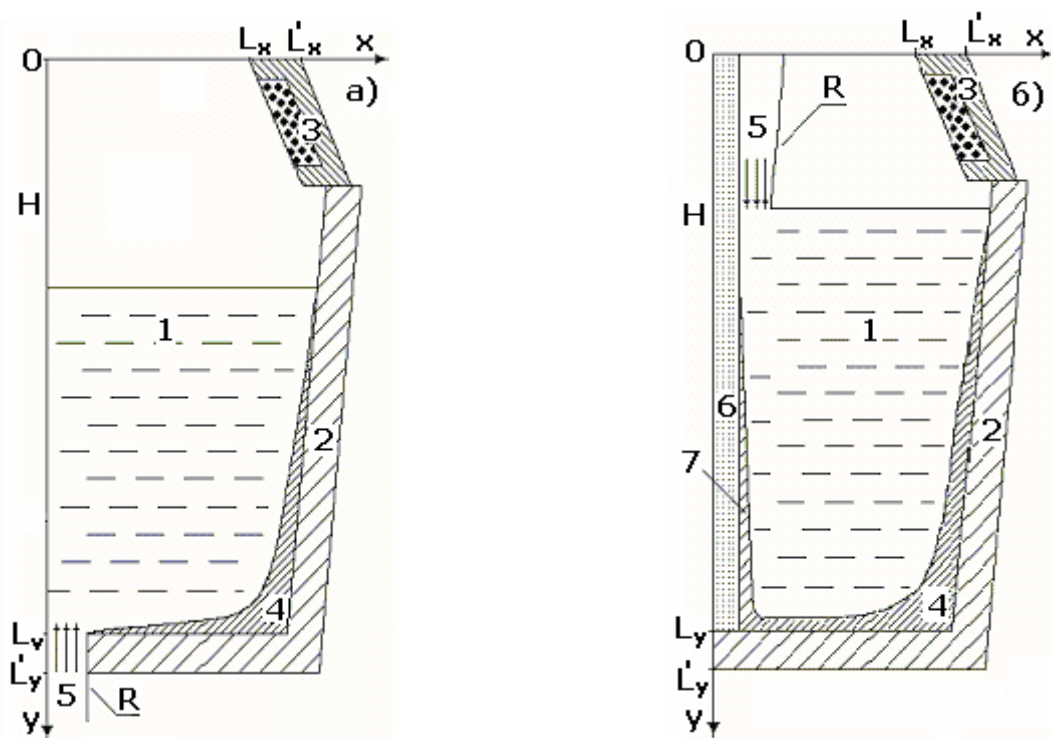


Рис. 1. Схема исследуемой области формирования слитка:

а) многослойный слиток – сифонная разливка;

б) армированный слиток – разливка сверху.

1 – расплав; 2 – изложница; 3 – прибыльная надставка; 4 – твердая фаза МС; 5 – струя расплава; 6 – ВХ; 7 – корочка на ВХ

На первом этапе в изложницу с использованием сифонной заливки поступает расплав основного соединения (марка стали 08X18T1) к уровню стыка изложницы и надставки. При этом часть расплава затвердевает у стенок и дна изложницы, формируя поверхностный слой легированной стали. На втором этапе металл некоторое время выдерживается в изложнице, при этом происходит формирование (увеличе-

ние толщины) поверхностного слоя. Этот период условно называется временами «выдержки». На третьем этапе расплав (Ст 10) в изложнице поступает сверху до уровня верхней границы прибыльной надставки, которая определяется технологией разливки. На протяжении этого времени под влиянием энергии струи и конвективного массопереноса происходит смешивание двух расплавов и образование расплава другого соединения, из которого при дальнейшей кристаллизации формируется внутренняя часть слитка. Образование нового расплава происходит довольно быстро, и поэтому теплофизические свойства и коэффициенты переноса в новом расплаве определяются его химическим составом.

При заполнении изложницы легированной сталью происходит затвердевание стали при идеальном тепловом контакте слитка с изложницей. Теплообмен излучением между расплавом и изложницей не учитывается. При формировании армированного слитка происходит разливка расплава сверху. Не учитывается удар падающей струи о дно изложницы и образование заплесков металла на ее стенки и поэтому предполагается, что изложница заполняется на 20 % своего объема.

В армированном слитке внутренний холодильник (ВХ) находится на оси симметрии и располагается в изложнице. Внутренний холодильник (в форме стржня) имеет круглую или квадратную форму, и его внешняя поверхность предполагается гладкой и свободной от окалины. Весь объем ВХ имеет одинаковую начальную температуру и химический состав – такие же, как и поступающий расплав.

В основу математической модели формирования многослойного и армированного слитков взяты нестационарные безразмерные уравнения переноса вихря скорости, переноса газовой фазы и теплопереноса в расплаве. Также в модели учитываются тепловые процессы, связанные с образованием доли твердой фазы, которая определяет кинетику кристаллизации в приближении неравновесной двухфазной зоны [1 – 3]:

– уравнение Навье – Стокса

$$\frac{\partial \omega}{\partial F_0} + V_x \frac{\partial \omega}{\partial X} + V_y \frac{\partial \omega}{\partial Y} = \frac{\partial}{\partial X} \left(Pr_{ef} \frac{\partial \omega}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(Pr_{ef} \frac{\partial \omega}{\partial Y} \right) + Pr_{ef}^2 Gr \frac{\partial \theta}{\partial X} + \frac{1}{Fr} \frac{\partial \beta_g}{\partial X}; \quad (1)$$

– уравнение вихря скорости ω

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial X^2} (1 - \xi) + \frac{\partial^2 \psi}{\partial Y^2} (1 - \xi) = -\omega; \quad (2)$$

– уравнение газосодержания β_r в расплаве

$$\frac{\partial \beta_g}{\partial F_0} + V_x \frac{\partial \beta_g}{\partial X} + V_y \frac{\partial \beta_g}{\partial Y} = 0; \quad (3)$$

– уравнение теплопереноса (θ – безразмерная температура)

$$c_{ef} \left(\frac{\partial \theta}{\partial Fo} + V_x \frac{\partial \theta}{\partial X} + V_y \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) = \frac{\partial}{\partial X} \left(\lambda_{ef} \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\lambda_{ef} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right); \quad (4)$$

– уравнение для доли твердой фазы ξ (θ_s, θ_L – солидус и ликвидус)

$$\xi = 1 - \left(1 + \frac{c_L}{L} T_0 (\theta_L - \theta_s) \right) \left[1 - \left(\frac{\theta_L - \theta}{\theta_L - \theta_s} \right)^{2/3} \right] + \frac{c_L}{L} T_0 (\theta - \theta_s). \quad (5)$$

Эффективные коэффициенты, входящие в уравнения, отражают многофазность среды [1, 2]. При рассмотрении турбулентных режимов движения коэффициент переноса импульса определяется, как эффективный, при этом избрана однопараметрическая модель Прандтля.

Система дифференциальных уравнений (1 – 5) замыкается крайними условиями. В начальный момент задаются постоянные значения температуры расплава и стенок изложницы, значение скорости и твердой фазы считаются нулевыми во всех точках расплава стали.

Граничные условия для системы слиток – изложница – окружающая среда задаются следующим образом. Для скорости движения расплава: непроницаемости и прилипания на твердых поверхностях, на оси слитка – условие симметрии. Для температуры: отсутствие потока тепла на оси слитка; на границах расплав – твердая фаза и расплав – внутренний холодильник, твердая фаза – изложница и твердая фаза – внутренний холодильник предполагается идеальный тепловой контакт. На внешних границах контакта изложницы с окружающей средой используется теплообмен по закону Ньютона-Рихмана.

Основные результаты исследований

Численное моделирование гидродинамических процессов в многослойном слитке показывает (рис. 2), что в зоне поступления расплава (зона – б) в изложницу происходит интенсивное его перемешивание, и наблюдается сложная картина распределения поля скорости (рис. 2,а). В месте поступления расплава (зона – б) образуется вихрь, который вызван действием заливочной струи и который интенсифицирует передачу теплоты через стенку изложницы. В таких тепловых условиях формируется корочка твердой фазы (зона – 3).

После выдержки металла в изложнице идет процесс образования слоя легированной стали необходимой толщины. Потом происходит долив расплава второго металла сверху (рис. 2,а).

Проникновение заливочной струи в расплав происходит на глубину, которая не превышает 1,2 м, что качественно совпадает с экспериментальными данными Ефимова В.А [4]. При этом величина скорости также коррелирует с экспериментальными исследованиями [4].

Разливка металла сверху приводит к возникновению, как естественной тепловой конвекции – вследствие теплоотвода с внешних границ изложницы, так и вынужденной – механическое воздействие струи расплава (рис. 2). При формировании слитка с ВХ большое значение имеет влияние гидродинамических процессов на ход затвердевания (рис. 2,б). Распространение заливочной струи (6) в расплаве вызывает конвекцию во всем объеме расплава и, прежде всего, способствует нагреву ВХ (5) и изложницы (2). При этом вследствие теплоотвода через стенку изложницы затвердевает расплав, у фронта затвердевания образуется двухфазная зона (4). Происходит перераспределение температуры в объеме слитка за счет восходящих (более горячих) потоков расплава (7) и нисходящих (более холодных – зона 8) у стенки изложницы и затвердевающей корочки слитка (3).

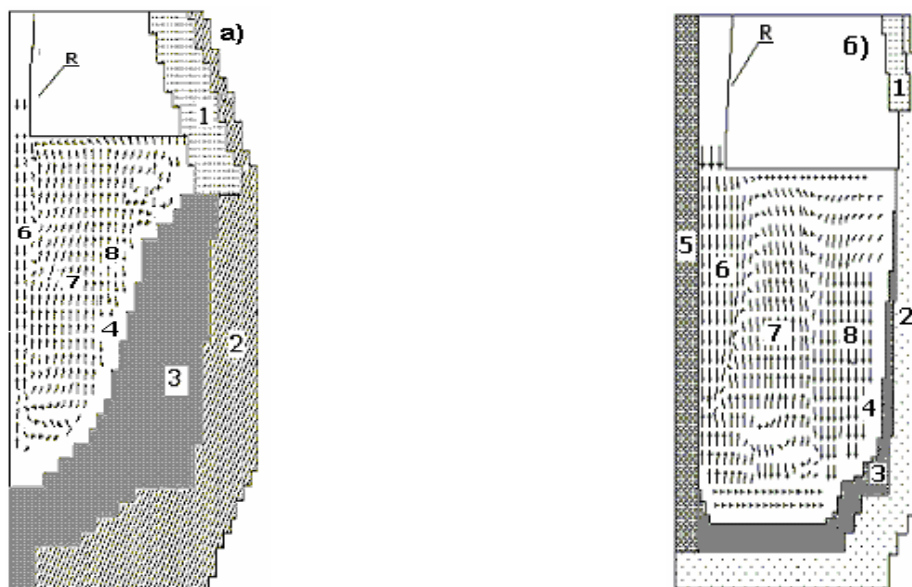


Рис. 2. Гидродинамические процессы при разливке сверху композитного слитка: а) многослойный слиток; б) слиток с внутренним холодильником.

- 1 – шамот, 2 – изложница, 3 – твердая фаза; 4 – двухфазная зона;
 5 – внутренний холодильник; 6 – заливочная струя в расплаве;
 7 – восходящие потоки в расплаве; 8 – нисходящие потоки расплава

Изучим особенности затвердевания армированного слитка на примере нагревания и плавления внутреннего холодильника диаметром 40 мм. На рис. 3,а показано распределение температуры для различных горизонтов. Отметим, что (рис. 3,в) на нижнем горизонте (у поддона) ВХ нагревается слабее, и в дальнейшем температура его поверхности уменьшается, что может отрицательно сказываться на монолитности соединения ВХ и заливаемого металла. При этом возмож-

ное нарушение монолитности происходит в самом низу слитка и идет в обреш, поэтому в дальнейшем это не отражается на качестве стали.

В верхней (рис. 3,б) части слитка такого падения температуры во ВХ не наблюдается. Практически все три слоя: поверхность ВХ, его внутренний слой и слой расплава, прилегающий к поверхности ВХ, – имеют одну и ту же температуру.

Таким образом, при диаметре ВХ 40 мм расплав слабо охлаждается у поверхности ВХ, т.к. масса ВХ относительно невелика. При этом величина теплового потока от расплава достаточна, чтобы прогреть все слои ВХ и даже в некоторых местах его расплавить.

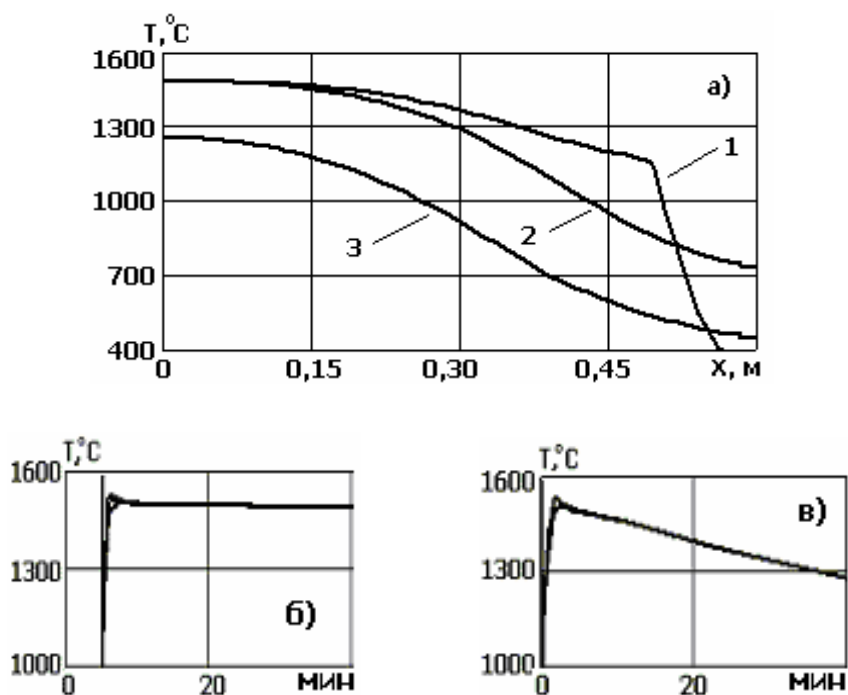


Рис. 3. Температура в армированном слитке (а) с ВХ диаметром 40 мм на различных горизонтах: 1 – 0,8 м; 2 – 1,5 м; 3 – 2,4 м. Нагревание и плавление ВХ диаметром 40 мм: б) верхняя часть слитка; в) нижняя часть слитка. 1 – на границе корочка ВХ- расплав; 2 – на внешнем слое ВХ; 3 – на внутреннем слое ВХ

Формирование армированного слитка с диаметром ВХ 120 мм отличается от слитка с диаметром ВХ 40 мм, что отражено в распределении температуры ВХ на различных его участках. При теплопередаче во ВХ диаметром 120 мм (рис. 4) градиенты температуры во ВХ и у поверхности увеличиваются, а температура уменьшается. Причем в нижней части слитка (рис. 4,в) расплав охлаждается больше, чем в верхней его части.

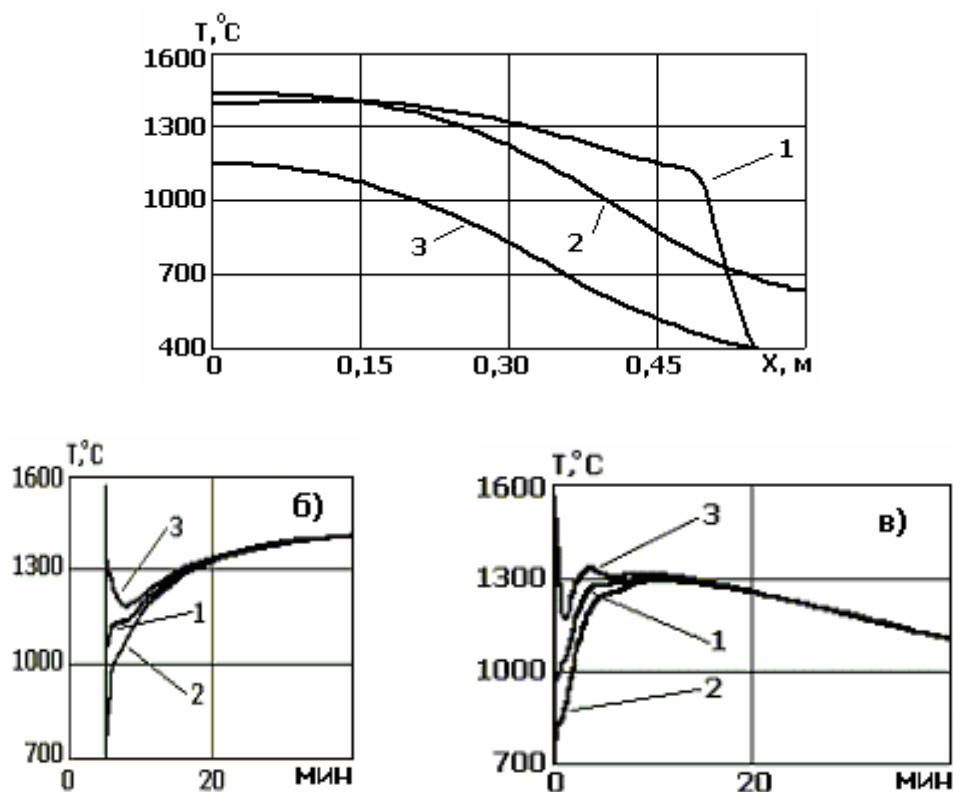


Рис. 4. Температура в армированном слитке (а) с ВХ диаметром 120 мм на различных горизонтах: 1 – 0,8 м; 2 – 1,5 м; 3 – 2,4 м.
 Нагревание и плавление ВХ диаметром 120 мм:
 б) верхняя часть слитка; в) нижняя часть слитка.
 1 – на границе корочка ВХ – расплав; 2 – на внешнем слое ВХ;
 3 – на внутреннем слое ВХ

Наибольшее различие температуры в слоях ВХ наблюдается в период заливки расплава, в дальнейшем в ходе развития теплопереноса в слитке ВХ прогревается, и температура в рассматриваемых слоях ВХ выравнивается. Т.е. увеличение диаметра ВХ до 120 мм понижает в большей мере температуру на границе расплав – внутренний холодильник в сравнении с предыдущим вариантом.

Следовательно, при затвердевании армированного слитка с диаметром ВХ от 40 мм до 120 мм обеспечивается монолитность его соединения с заливаемым расплавом.

Теплофизические процессы во многом определяют размер кристаллов в слитке. Размер кристаллического зерна при традиционном рассмотрении (в первом приближении) пропорционален корню квадратному от времени затвердевания данного объема стали. Отметим, что значение коэффициента пропорциональности найти для каждой марки стали непросто. Поэтому для характеристики кристаллической структуры будем использовать относительный размер кристалла d_1 , как часть от максимального его значения в слитке $\bar{D} = d_1 / d_{\max}$.

Оценка дендритной структуры металла осуществлялась на основании опытов Самойловича Ю.А. [5], которые показывают, что ветви дендрита первого порядка d_1 в зависимости от градиента температуры G в области роста дендрита и скорости затвердевания слитка U определяются согласно соотношению:

$$d_1 = k_1 U^{-0,26} G^{-0,75} \quad (6)$$

Сравнение размеров зерна для обычного и многослойного слитков (рис. 5, а) показывает, что долив второго металла приводит к укрупнению размера кристаллов.

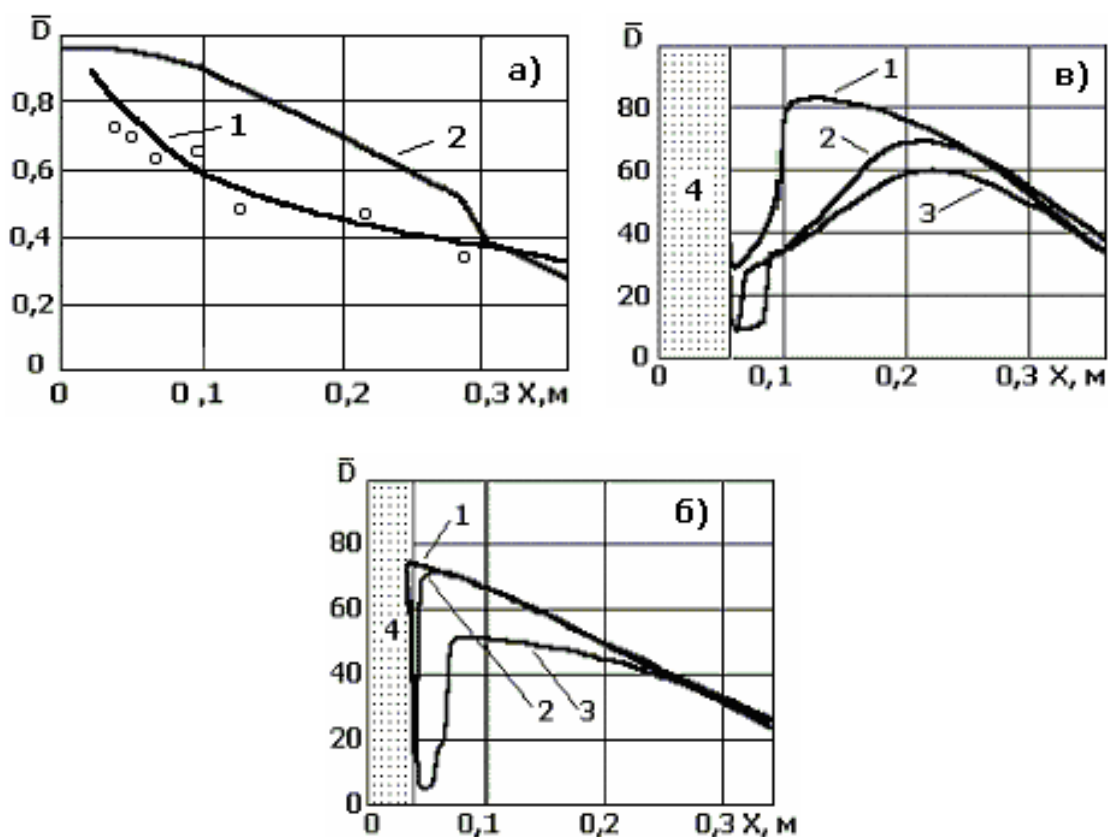


Рис. 5. Изменение диаметра кристалла в слитке: а) 1 – экспериментальные данные Гуляева Б.Б. [5], 2 – расчет по формуле Самойловича Ю.А [4]; б) слиток с ВХ диаметром 80 мм; в) слиток с ВХ диаметром 120 мм; на горизонтах от дна слитка: 1 – верхняя часть слитка – 2,1 м; 2 – середина слитка – 1,4 м; 3 – нижняя часть слитка – 0,6 м; 4 – внутренний холодильник

Такое распределение по размерам кристаллов качественно согласуется с известными теоретическими и экспериментальными данными [5 – 8]. Полученные результаты вычислительного эксперимента [9, 10] по определению размеров кристаллов сравнивались с результатами

Б.Б. Гуляева [6] (рис.5, б). Качественное совпадение результатов говорит об адекватности математической модели, описывающей структуру слитков.

Проводилось сравнение кристаллической структуры армированного слитка [9] с ВХ диаметром 80 мм – (рис. 5,б) и диаметром 120мм (рис. 5,в). Полученное распределение размера кристаллов обусловлено тем, что в месте ввода ВХ происходит охлаждение расплава более интенсивно, чем в других областях расплава. При этом, чем диаметр ВХ больше, тем больший поток теплоты идет во внутренний холодильник и, следовательно, происходит увеличение температурных градиентов и уменьшение размеров кристаллов согласно приведенной формуле (6).

Таким образом, структура стали определяется как конвективным теплопереносом в расплаве, так и градиентами температуры в твердой части слитка и влиянием на эти процессы внутреннего холодильника.

Выводы

1. Разработана математическая модель гидродинамических и теплофизических процессов при формировании многослойного и армированного стального слитков, которая позволяет определить поля температуры, скорости расплава, твердой фазы при различных режимах разлива расплава в изложницу и в ходе затвердевания слитка.

2. Сопоставление результатов математического и физического моделирования свидетельствует об адекватности математической модели формирования многослойного и армированного слитков.

3. На основании расчета градиентов температуры и скорости затвердевания получена дендритная структура многослойного слитка и армированного слитка в зависимости от размера внутреннего холодильника.

4. Получены температурные поля армированного слитка на различных горизонтах для различных размеров внутреннего холодильника. Исследован процесс нагревания и кинетика плавления внутреннего холодильника. Определены размеры внутреннего холодильника, которые обеспечивают монолитность его соединения с металлом в армированном слитке.

Список литературы

1. Затвердевание металлических композиций: производство и моделирование / [В. А. Лейбензон, Ф. В. Недопекин, В. В. Кондратенко и др.]. – Донецк : Юго-Восток, 2005. – 228 с.

2. Затвердевание металлов и металлических композиций / [В. А. Лейбензон, В. Л. Пилушенко, В. В. Кондратенко и др.]. – Киев : Наукова думка, 2009. – 409 с.

3. Недопекин Ф. В. Математическое моделирование тепломассопереноса при формировании многослойного слитка / Ф. В. Недопекин, В. В. Белоусов, В. М. Мелихов [и др.] // Известия РАН. Металлы. – 2001. – № 6. – С. 40–44.
4. Ефимов В. А. Разливка и кристаллизация стали / В. А. Ефимов. – М. : Металлургия. – 552 с.
5. Самойлович Ю. А. Стальной слиток. Затвердевание и охлаждение. В 3-х т. Т. 2 / Ю. А. Самойлович, В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, В. В. Филиппов. Под общ. ред. В. И. Тимошпольского, Ю. А. Самойловича. – Мн. : Белорусская наука, 2000. – 637 с.
6. Гуляев Б. Б. Литейные процессы / Б. Б. Гуляев. – М. : Машгиз, 1960. – 274 с.
7. Шмрга Л. Затвердевание и кристаллизация стальных слитков / Л. Шмрга. – М. : Металлургия, 1985. – 248 с.
8. Мелихов В. М. Термодинамический анализ роста кристаллов в слитке / В. М. Мелихов, В. Ф. Комаров // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1998. – № 1. – С. 75–76.
9. Недопекин Ф. В. Гидродинамика и теплоперенос в формирующемся слитке с внутренним холодильником / Ф. В. Недопекин, В. Ф. Поляков, В. В. Белоусов, В. М. Мелихов // Изв. РАН Металлы. – 1998. – № 5. – С. 24–28.
10. Лейбензон В. А. Математическое моделирование формирования литой композиции углеродистой и хромистой сталей / В. А. Лейбензон, Ф. В. Недопекин, В. М. Мелихов [и др.] // Сталь. – 2004. – № 2. – С. 55–57.

Рукопись поступила 30.10.2009 г.