

2. Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия. Введение. М.: — Мир, 1989. - 362 с.
3. Дёмин А.Ю. Кудинов А.В. Компьютерная графика. Т.: — Издательство Томского государственного университета, 2005. - 256 с.
4. Кирмасов А.Б. Анализ пространственных данных в геологии средствами ArcView /А.Б. Кирмасов, к. г.-м. н., н.с. лаб. тектонофизики геол. ф-та МГУ // Современные геоинформационные технологии. - 2002. - №2 (21). - С. 13. — Режим доступа до статті: <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1164027>
5. Scion Image for Windows. Manual Guide. - Scion corp. 2000. - 107 с.
6. ВидеоТесТ-Мастер (Структура), Версия 4.0, Программное обеспечение для анализа изображений в материаловедении под Windows 9x, 2000, XP. Краткое описание. - Санкт-Петербург: ООО ВидеоТесТ, 2002. — 15 с.

пост. 17.11.2010

Численное исследование теплообменных процессов при формировании КОМПОЗИТНЫХ СЛИТКОВ

МЕЛИХОВ В.М.

Донецкий национальный университет

За допомогою обчислювального експерименту визначені основні закономірності розвитку теплофізичних та гідродинамічних процесів, у тому числі: адекватність математичної моделі формування композитних зливків, полючи температури, швидкості розплаву, твердої фази, вплив внутрішнього холодильника на кінетику композитного зливка.

При помощи вычислительного эксперимента определены основные закономерности развития теплофизических и гидродинамических процессов, в том числе: адекватность математической модели формирования композитных слитков, поля температуры, скорости расплава, твердой фазы, влияние внутреннего холодильника на кинетику композитного слитка.

With the help of computational experiments identified the main regularities of thermophysical-ray and hydrodynamic processes, including: the adequacy of the mathematical model of the formation of composite-governmental ingots, the temperature field, the rate of melt, solid phase, the influence of domestic refrigerator on the kinetics of the composite ingot.

Введение. Одним из основных направлений решения задачи повышения качества стальных изделий, является получение слитков, которые состоят из нескольких слоев сталей с различными теплофизическими свойствами – многослойных и армированных с внутренним холодильником. Целью настоящей статьи явилось: определение основных закономерностей развития теплофизических и гидродинамических процессов, в том числе определение адекватности математической модели формирования композитных слитков; определение поля температуры, скорости расплава, твердой фазы при различных режимах формирования композитного слитка; исследование влияния внутреннего холодильника (ВХ) на кинетику композитного слитка.

Постановка задачи. Постановка и решение задачи осуществлялось в двумерной постановке для стального квадратного слитка, уширенного сверху [1-3]. В виду симметрии системы слитков - изложница область исследования выбиралась как половина продольного сечения композитного слитка.

Согласно технологии получения многослойного слитка (МС) в начале в 11- тонную 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 увеличение толщины поверхностного легированного слоя слитка. Этот период условно называется временами «выдержки». На третьем этапе расплав (Ст10) в изложницу поступает сверху до уровня верхней границы прибыльной надставки, которая определяется технологией разливки. Предполагается, что образование нового расплава происходит довольно быстро и не рассматривается смешивание расплавов. Поэтому теплофизические свойства и коэффициенты переноса в новом расплаве определяются его химическим составом.

При формировании слитка затвердевание стали происходит при идеальном тепловом контакте с изложницей и ВХ. Теплообмен излучением между расплавом и изложницей не учитывается. При разливке сверху и не учитывается удар падающей струи о дно изложницы и образование заплесков металла на ее стенки. Предполагается, что изложница заполняется на 20% своего объема для предотвращения заплесков.

Внутренний холодильник в армированном слитке находится на оси симметрии изложницы. Он имеет форму стрелы квадратного сечения, и его поверхность предполагается гладкой и свободной от окалины. ВХ имеет одинаковую начальную температуру и химический состав - такие же, как и поступающий расплав стали.

В основу математической модели формирования композитного слитка взяты нестационарные безразмерные уравнения тепломассопереноса и гидродинамики. В модели учитываются тепловые процессы, связанные с образованием доли твердой фазы [1- 3], которая определяет кинетику кристаллизации в приближении неравновесной двухфазной зоны:

уравнение Навье – Стокса

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

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_g 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)

$$c_{ef} \left(\frac{\partial \theta}{\partial F_0} + V_x \frac{\partial \theta}{\partial X} + V_y \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) = \frac{\partial}{\partial X} \left(\lambda_{ef} \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\lambda_{ef} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) \quad (4)$$

уравнение для доли твердой фазы ξ

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

где V_x, V_y - компоненты скорости, ψ - функция тока; T_0 - характерная температура; θ_S, θ_L - безразмерные температуры солидус и ликвидус; c_L - теплоемкость расплава; L - теплота кристаллизации.

Эффективные коэффициенты переноса (c_{ef}, λ_{ef}), входящие в уравнения, отражают многофазность среды [1,3]. При рассмотрении турбулентных режимов движения коэффициент переноса импульса определяется, как эффективный, при этом избрана однопараметрическая модель Прандтля.

Граничные условия для системы слитков - 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.

Для численной реализации математической модели процессов был сформулирован вычислительный алгоритм решения процессов теплопереноса и гидродинамики. Система дифференциальных уравнений (1-5) решалась при помощи численных методов с применением эффективных разностных схем [4,5].

Основные результаты исследований. Проведен предварительный анализ устойчивости решения математической модели формирования композитных слитков. Вычислительный эксперимент показал, что гидродинамические процессы при формировании многослойного слитка после долива расплава до уровня прибыльной части имеют некоторые особенности. Долив расплава второго металла в изложницу (рис. 1,а) сопровождается формированием вертикального потока, который расширяется в нижней части, где скорость потока приближается к нулю. В дальнейшем после заливки до прибыльной части происходит образование большого вихря (рис. 1,б), который изменяет направление на противоположное, т. к. вызван естественной тепловой конвекцией. Затем этот вихрь разбивается на несколько вихрей (рис. 1,в), и здесь проявляется воздействие отвода тепла от стенок изложницы и формирование твердой фазы на фронте затвердевания.

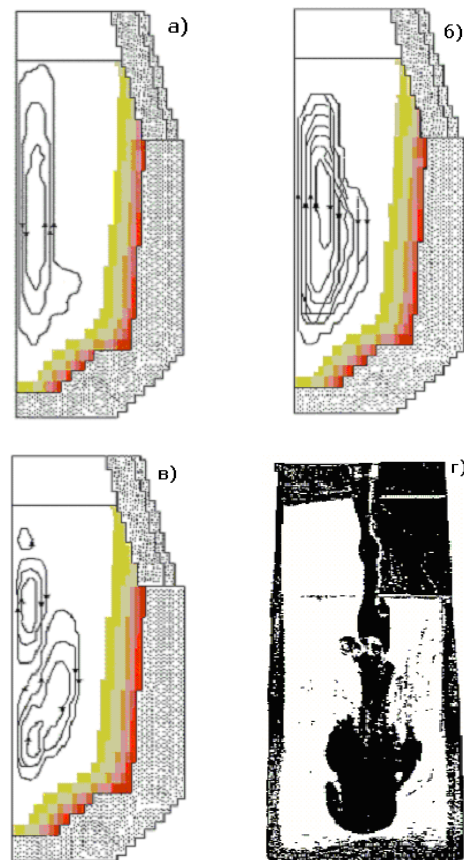


Рис. 1. Изменение функции тока после выдержки и долива расплава в изложницу. В моменты времени после выдержки металла: а) – 1 мин; б) – 2 мин; в) -3 мин; г) физическое моделирование [6, 7]

Благодаря экспериментам [6, 7] появилась возможность сопоставления результатов вычислительного эксперимента (рис.1,а) и физического моделирования (рис.1,г), которое показывает качественное совпадение гидродинамической обстановки в период доливки расплава до прибыли.

Рассмотрим формирование армированного слитка (рис. 2). Разливка металла сверху приводит к возникновению, как тепловой конвекции – вследствие теплоотвода с внешних границ изложницы, так и вынужденной, как результат действия струи расплава. Гидродинамическая обстановка выражена в распределении изолиний функции тока (рис. 2, а). При этом происходит теплообмен ВХ расплавом и поэтому наступает перераспределение потоков в объеме изложницы (рис. 2,б). Влияние конвекции вызванной заливкой расплава уменьшается, и основной вклад в перемешивание расплава вносит тепловая конвекция, которая возникает в результате охлаждения расплава. При этом к конвекции у стенки изложницы, которая характерна для затвердевания обычного слитка, добавляется конвекция у поверхности ВХ. Возникают нисходящие потоки у ВХ, вследствие охлаждения расплава у его поверхности и в период его прогревания здесь наблюдается наибольшее движение расплава.

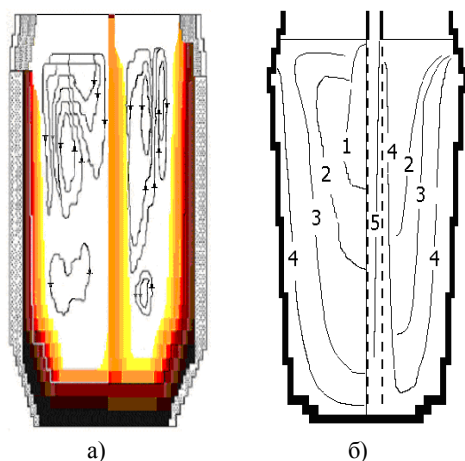


Рис. 2. Процессы гидродинамики и теплопереноса (справа - до введения ВХ в расплав; справа – после ВХ): а) распределение изолиний функции тока в расплаве; б) распределение изотерм в слитке: 1- 560°C; 2 - 1490°C; 3- 1420°C; 4 - 1350°C; 5 - 850°C.

До погружения ВХ в расплав значения изотерм на оси слитка принимают значения близкие к температуре разливаемого расплава с постепенным уменьшением к стенке изложницы (рис. 2, б). Тепловые процессы при погружении ВХ в расплав протекают таким образом, что у поверхности стержня с одной стороны расплав охлаждается, с другой стороны расплав передает тепло, нагревая при этом поверхность стержня.

При формировании армированного слитка диаметра 40мм изменение температуры поверхности ВХ в разные моменты времени (рис. 3.) показывает, что прогрев поверхности ВХ и ее понижение и происходит сложным образом. Вначале происходит нагрев этой поверхности, затем такое же интенсивное ее охлажде-

ние (рис. 3,а). При увеличении размера ВХ охлаждение поверхности стабилизируется. Это связано с тем, что увеличение диаметра приводит к быстрому снятию перегрева, а вместе с тем и понижаются температурные градиенты, как в расплаве, так и в стержне. При этом влияние тепловой конвекции на затвердевание в системе ВХ – расплав уменьшается. Изменение температуры поверхности стержня диаметров 80мм происходит сходным образом (рис. 3. б). Отличительной особенностью применения ВХ толщиной 80мм является более интенсивное понижение температуры у поверхности холодильника с увеличением его диаметра.

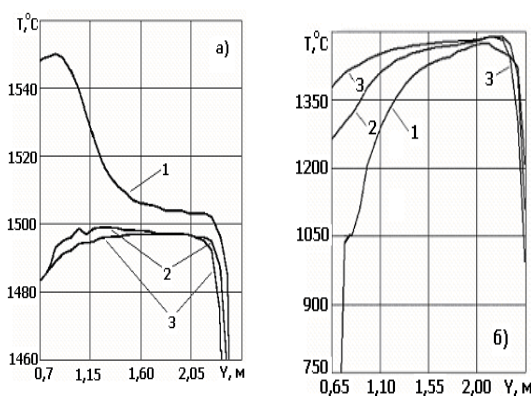


Рис. 3. Изменение температуры по высоте слитка на поверхности ВХ: Диаметр: ВХ а) - 40мм; б) - 80мм. В моменты времени: 1 – 6 мин; 2 – 11 мин; 3 – 21 мин.

Численное моделирование гидродинамических процессов в многослойном слитке показывает (рис. 4), что в зоне поступления расплава (зона - б) в изложницу происходит интенсивное его перемешивание и наблюдается сложная картина распределения поля скорости (рис. 4,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.4, а). Во время заливки сверху (рис. 4, б и рис. 4, в) происходит уменьшение доли твердой фазы в различных точках фронта затвердевания МС. На рис. 5 показано изменение кинетики затвердевания в различных точках по вертикали (вдоль фронта затвердевания). Представленные рисунки изображены по мере проникновения струи сверху вниз с горизонта 1м до 1,3м, заметно влияние конвекции на образование твердой фазы.

Так, на расстоянии 0,4м от оси слитка и 1м от верха слитка (рис. 4, б) изменение доли твердой фазы более существенно, чем на 0,3м от оси слитка и глубине 1,3м (рис. 4, в).

По мере проникновения струи в расплав ее тепловое влияние уменьшается и уже на горизонте 1,4 м от верхнего уровня металла влияние струи образования твердой фазы незначительно [8,9].

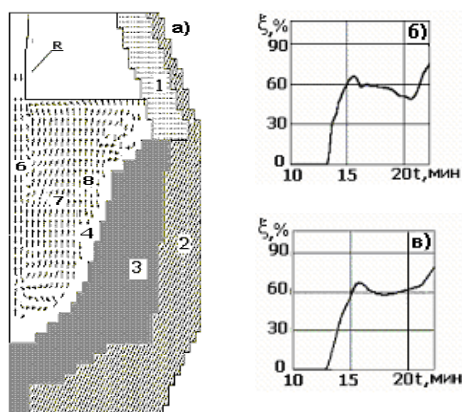


Рис. 4. Гидродинамические процессы при разливке сверху композитного слитка: а) многослойный слиток. Изменение твердой фазы по времени на фронте затвердевания. На глубине б) – 1м; в) – 1,3м.

Для исследования кинетики формирования армированного слитка рассмотрим его затвердевание во времени на примере диаметра ВХ 80мм (рис. 5). При этом определяется доля затвердевшего слитка ко всему объему в процентах. Как представлено на рис. 5, на время затвердевания слитка оказывает влияние как диаметр ВХ, так и тепловая конвекция (рис. 5,а).

Время затвердевания армированного слитка без учета гидродинамических процессов (кривая - 1) значительно увеличивается в 1,5 раза, по сравнению с учетом гидродинамических процессов и тепловой конвекции (кривая - 2).

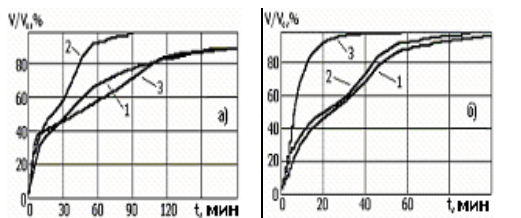


Рис. 5. Кинетика затвердевания: армированного слитка а) диаметр ВХ- 80мм слиток 1- без влияния гидродинамики; 2 – с учетом влияния гидродинамики; 3 - обычный слиток; б) затвердевание армированного слитка с ВХ диаметром: 1 - 40мм; 2 - 80мм; 3 - 120мм.

Это сопоставление показывает, какое значение имеют гидродинамические процессы для времени затвердевания слитка. Кроме того, произвели сравнение времени затвердевания армированного слитка и обычного слитка (кривая - 3). При этом время затвердевания обычного слитка (кривая - 3) без применения ВХ больше и сравнимо со временем затвердевания без учета конвекции.

Изменение толщины применяемого ВХ при армировании слитка показывает (рис. 6,б), что при этом время затвердевания уменьшается с 110 минут при диаметре 40мм (кривая - 1) до 60 минут при диаметре ВХ 120мм

(кривая - 3). Причем уменьшение времени затвердевания происходит больше всего при диаметре ВХ 120 мм.

Выводы

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 разливки расплава в изложницу и в ходе затвердевания слитка. Сопоставление результатов математического и физического моделирования свидетельствует об адекватности математической модели формирования многослойного и армированного слитка.

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.

Исследована зависимость времени затвердевания армированного слитка от поперечного размера внутреннего холодильника.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Лейбензон, Ф. В. Недопекин, Кондратенко, В.М. Мелихов и др. Затвердевание металлических композиций: производство и моделирование. Донецк, Юго-Восток. 2005. - с. 228.
2. Мелихов В.М. Математическое моделирование гидродинамики и теплопереноса при формировании многослойных слитков /В.М. Мелихов // Вісник Донецького університету, Сер. А. Природничі науки. - 2009. - №1. — С. 436-443.
3. 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. Самарский А.А. Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.Н.Вабищевич. М.: УРСС, 2003. – 784.
5. Полежаев В.И. Математическое моделирование конвективного тепло- и массообмена на основе уравнений Навье-Стокса / В.И. Полежаев, Н.А. Бунэ, Н.А. Везуб – М.: Наука, 1987. – 270 с.
6. Титова Т.М., Кондратенко В.М., Поляков С.Н., Молчанов В.А. Опыт производства металлопроката из двухслойных сталей // Процессы литья.- 1997.- № 4. - С. 23-26.
7. Ствопченко А.П., Титова Т.М. Некоторые особенности формирования литых композитов // Процессы литья. - 1999.- №2. - С. 65-71.
8. Разливка и кристаллизация стали / В. А. Ефимов – М.: Металлургия. – 552 с.
9. Самойлович Ю. А. Стальной слиток. Затвердевание и охлаждение. Т. 2 в 3-х т. / Ю. А. Самойлович, В. И. Тимошпольский, И.А.Трусо-ва, В.В. Филиппов. Под общ. ред. В.И. Тимошпольского, Ю.А. Самойловича – Мн.: Белорусская наука, 2000. – 637 с.