

Вычислительный эксперимент по оптимизации технологии заливки и затвердевания двухслойного слитка «жидкий сэндвич». сообщение 2

СТОВПЧЕНКО А.П. *, ГОЛОВАЧЕВ А.Н. *, БОЛОТОВ В.Ю., ПАВЛЮЧЕНКОВ И.А.

Национальная металлургическая академия Украины*
Днепропетровский государственный технический университет

Приведены результаты расчетов математической модели процесса разлива и затвердевания двухслойных слитков по схеме «жидкий сэндвич». Проведен анализ и найдены оптимальные величины основных технологических параметров (время выдержки первого расплава стали Р6М5 в изложнице перед добавлением второго - 40Х, температуры разлива обоих расплавов, массовая скорость долива второго расплава), позволяющие получить двухслойный слиток быстрорежущей стали высокого качества.

Приведені результати розрахунків математичної моделі процесу розливання і твердіння двошарових злитків по схемі «рідкий сандвіч». Проведено аналіз і знайдені оптимальні величини основних технологічних параметрів (час витримки першого розплаву стали Р6М5 у виливниці перед додаванням другого - 40Х, температури заливки обох розплавів, масова швидкість доливи другого розплаву), що дозволяють отримати двошаровий злиток швидкорізальної сталі високої якості.

There were provided results of mathematical model calculations for cast and thermosetting process of two-layer bars on basis of scheme «liquid sandwich». Analysis has been conducted and on its basis were detected optimum sizes of basic technological parameters (time of self-control of the first fusion R6M5 in mould before addition of the second - 40X, temperatures of both fusions cast, mass speed of second fusion addition), allowing to get the two-layer bar of high quality high-speed steel.

Введение. Использование возможностей математического моделирования является наиболее эффективным решением сложных задач металлургического производства, позволяя найти точные решения с минимальными материальными и физическими затратами. К этому числу относится изучение процесса затвердевания слитка во времени, для чего физические методы исследования затруднительны и не всегда эффективны.

Отливка композитного слитка по технологии «жидкий сэндвич» [1] предусматривает долив порции стали в частично затвердевшую сталь иного состава, залитую ранее в изложницу. Возникающие при этом сложные процессы – конвективные массо-, теплоперенос и сложный химический состав промышленных сталей и сплавов требуют моделирования применительно к конкретным условиям формирования слитка (его геометрические размеры, теплопроводность изложницы, химический состав стали и др.).

С целью определения времени, необходимого для формирования наружного слоя 3,6 т композитного слитка быстрорежущей стали в условиях ОАО «Днепропетсталь» им. А.Н. Кузмина, построена двухэтапная математическая модель, постановка которой изложена в 1 сообщении предыдущей работы [2]. При этом варьировали три основных параметра, позволяющих управлять процессом формирования двухслойного слитка: температурой и временем выдержки первого расплава в изложнице (определяющем толщину наружного слоя композита) и длительностью (массовой скоростью) долива второго металла.

Численный расчет процесса формирования слитка быстрорежущей стали.

Проанализировано влияние температуры заливки быстрорежущей стали Р6М5, формирующей основной слой, на вертикальную и горизонтальную составляющие скорости движения потоков расплава в жидком объеме слитка на конечном этапе заполнения изложницы сифоном. С этой целью рассчитали значения скорости потока при температуре заливаемой стали от 1773 К до 1873 К. Исследуемый температурный интервал выбран с учетом физических параметров и технологических особенностей разлива быстрорежущей стали марки Р6М5. Сравнивали результаты, полученные в 6 контрольных точках на верхнем и нижнем горизонтах слитка на расстояниях 30 мм от стенки изложницы, на расстоянии $\frac{1}{2}$ радиуса слитка, и на оси слитка. Установлено, что во всех контрольных точках разница величин вертикальной составляющей скорости движения расплава для всего рассмотренного интервала температур не превышает 2 мм/с; горизонтальной – 0,5 мм/с. Это говорит о том, что температура расплава не является основным фактором, влияющим на скорость его движения.

Оценили влияние температуры разлива первого расплава на динамику затвердевания наружного слоя. По расчетным полям температур в слитке определили толщину затвердевшего слоя. Показано (рис. 1), что с повышением температуры заливки металла величина формирующейся твердой корки закономерно уменьшается. Причем, в головной части слитка, где сосредоточен тепловой центр, корка толщиной более 15 мм (размер счетной ячейки) намораживается только при минимальной (из рассматриваемых) температуре заливаемого металла 1773 К (выше температуры ликвидуса на 50 К).

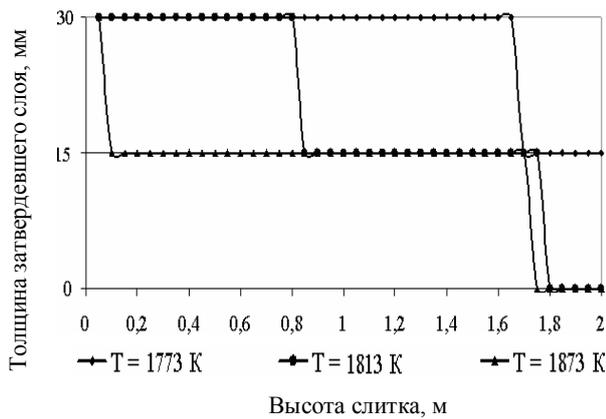


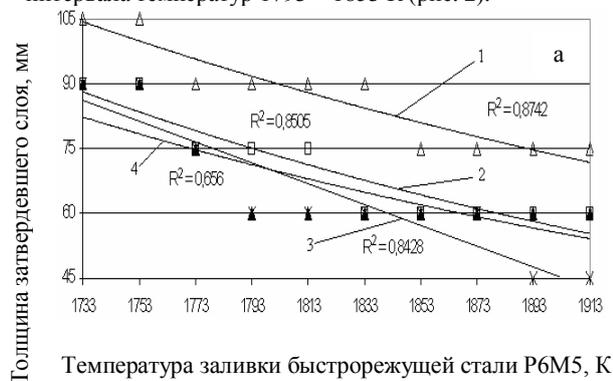
Рис. 1. Толщина затвердевшего слоя по высоте слитка в момент конца заливки металла сифоном при различной температуре разлива.

За время заливки металла сифоном (в течении 200 с), расплав стали Р6М5 с минимальной температурой образует твердый слой толщиной 30 мм на 82-х % высоты слитка (1650 мм из 2000 мм тела слитка). Время намораживания до этой толщины, при постоянном поступлении жидкого металла в изложницу, составляет 30 – 35 с, а образование корки, толщиной 15 мм, происходит практически мгновенно за счет теплоаккумулирующего действия стенок изложницы. При дальнейшей выдержке тепловой поток уменьшается и скорость роста твердого слоя падает.

Повышение температуры расплава приводит к тому, что мгновенно намороженный слой составляет менее 15 мм (величина его находится за пределом установленного шага по координате) и достигает этой величины только по истечению 25 с контакта жидкого металла со стенкой изложницы. Толщины 3 см корка достигает через 120 с.

При температуре разлива 1873 К для формирования твердого слоя толщиной в 15 мм необходимо уже 30 с, а увеличение его до 30 мм не происходит в течении всего времени наполнения (200 с) изложницы, за исключением нижнего горизонта слитка, где проявляется охлаждающее действие поддона.

Для всех рассмотренных температур разлива быстрорежущей стали Р6М5 формирование наиболее стабильного по толщине твердого слоя происходит для интервала температур 1793 – 1853 К (рис. 2).



Температура заливки быстрорежущей стали Р6М5, К



Рис. 2. Толщина твердой корки в зависимости от температуры расплава после 8 мин выдержки (а) и положение выбранных контрольных точек (б).

Поскольку равномерность толщины слоев композита является одним из условий стабильности свойств получаемого инструмента, то рекомендовано выдерживать слиток до долива в течение этого времени (± 1 минута).

Следует отметить, что время выдержки первой порции металла до долива является важным технологическим параметром, поскольку определяет толщину слоев формируемого композита. Кроме того, ее можно менять в довольно широких пределах (0 – 15 мм), что позволяет путем численного эксперимента оптимизировать технологию долива.

Для определения влияния времени выдержки расплава на величину и равномерность формирующегося твердого слоя по высоте, по рассчитанным полям температур, построены соответствующие зависимости, для температуры 1833 К, которая, приведена на рис. 3.

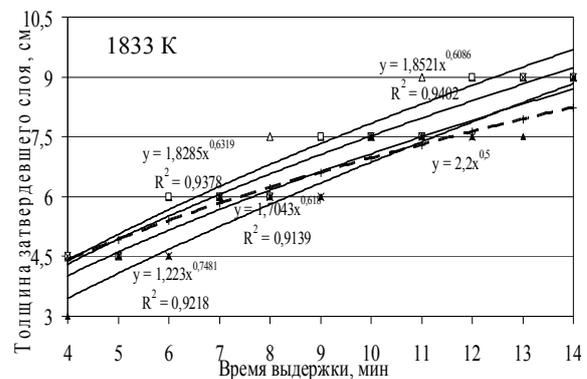


Рис. 3. Зависимость толщины твердой корки от времени затвердевания стали

С целью проверки адекватности результатов математического моделирования процесса кристаллизации, на график нанесена зависимость, построенная по закону квадратного корня (пунктиром) [3]. Показано, что разница между величинами толщин затвердевшего слоя, рассчитанными данной программой и по закону квадратного корня, во всем временном промежутке выдержки (от 4 до 14 минут, с шагом в 1 минуту), не превышает 15 мм, что находится в пределах погрешности программы (заданного шага по координате).

Коэффициент детерминации уравнений соответствующих зависимостей, построенных по результатам численных экспериментов, довольно высок (0,91 – 0,94), а тип зависимости полученных линий тренда, значения коэффициентов и показателя степени в описывающих их формулах близки к таковым в формуле квадратного корня.

Наибольшая толщина твердого слоя, со стороны стенки изложницы, (помимо полностью закристаллизовавшегося донного) наблюдается на прилегающем к нему горизонте (100 мм от дна), где сохраняется охлаждающий эффект дна изложницы.

Толщина твердого слоя на уровне зеркала металла во всем выбранном временном интервале не превышает максимального значения в центральной и нижней части слитка. Это показывает отсутствие образования корки с поверхности слитка, что могло бы стать препятствием доливке металла второго состава.

Минимальная толщина твердого слоя характерна для 1950 мм высоты слитка, где находится его тепловой центр. Эта часть не уходит в головную обрезь слитка и будет представлять полноценное рабочее тело инструмента и, следовательно, именно она представляет собой «узкое место», по которому следует определять необходимое время выдержки для формирования наружного слоя заданной толщины.

Важной технологической операцией при применении технологии производства слитка по методу «жидкий сэндвич» является обеспечение полного проникновения струи доливаемого металла и возможно более равномерное его смешение с жидким объемом стали, залитым ранее. Выполнение этого условия позволит повысить однородность по химическому составу внутренней части слитка и, как следствие, усреднение механических свойств всей партии изделий.

Масса доливаемого металла одинакова (определяется объемом прибыльной надставки и соответствует 580 кг) и, следовательно, длительность долива (выбранная минимальная составляет 20 сек; максимальная – 60 сек) определяет среднюю массовую скорость разлива (в килограммах в секунду). Поскольку смешение происходит за счет энергии струи расплава, доливаемого в объем прибыльной надставки слитка, на втором этапе заполнения, построены зависимости влияния массовой скорости разлива (рассчитанной по длительности долива) на глубину проникновения струи металла по оси слитка (рис. 4).

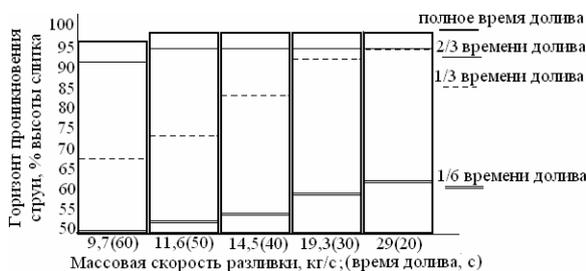


Рис. 4. Зависимость глубины проникновения струи металла (длины пути) от массовой скорости разлива.

Так, в первый момент долива, с массовой скоростью подачи 9,7 кг/с (общая продолжительность

наполнения 580 кг металла составляет 60 сек), первые порции горячего металла проникают на глубину 50 % высоты тела слитка. По мере заполнения объема прибыльной надставки струя металла проникает вглубь и достигает поверхности кристаллизующегося металла у дна слитка на последних секундах долива. Увеличение скорости долива до 11,6 кг/с (50 сек) приводит, на последнем этапе долива, к подмыву твердого донного слоя металла в осевой зоне слитка.

Дальнейшее повышение массовой скорости, до 14,5 кг/с (40 сек) и, далее, до 19,3 кг/с (30 сек), сопровождается увеличением кинетической энергии струи, которая, достигая дна, подплавляет нижний слой твердого металла и проникает до горизонта 96 % высоты слитка (рис. 5). Диаметр лунки в нижнем затвердевшем слое в этом случае составляет 90 мм.

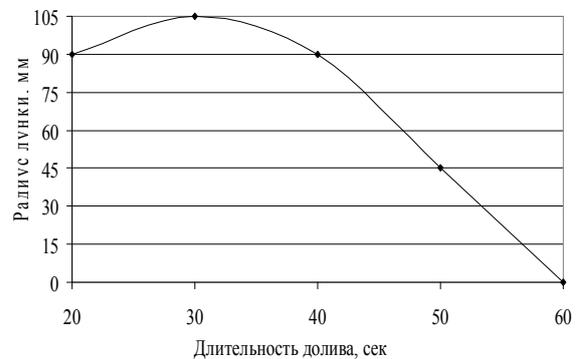


Рис. 5. Радиус вымываемой лунки в донном слое (50 до 100 мм дна) по оси слитка при разной длительности долива.

При длительности долива 20 секунд (массовая скорость 29 кг/с) струя максимально быстро (менее 4-х секунд) вступает в контакт с твердой поверхностью металла, что позволяет предполагать высокую скорость отражения от дна и разворота ее, с одновременной турбулизацией и, как следствие, активное перемешивание объемов исходного и доливаемого расплава.

Максимальный диаметр (105 мм) лунки, вымываемой в затвердевшем донном слое, наблюдается при массовой скорости наполнения 19,3 кг/с. При такой скорости долива, по-видимому, длительность контакта нисходящего по оси слитка потока с нижним затвердевшим слоем будет также наибольшим. Энергии струи достаточно до достижения и подмыва этого слоя, после чего происходит подъем горячих масс металла и их смешение с остальным объемом.

При длительности долива 40 с (14,5 кг/с) и 50 с (11,6 кг/с) происходит уменьшение радиуса лунки за счет снижения кинетической энергии струи и, следовательно, снижения интенсивности ее проникновения. Однако, и в последнем случае происходит размыв лунки радиусом 45 мм. При увеличении длительности долива до 60 с (9,7 кг/с) размыва (при заданной точности расчета по поперечному сечению слитка 15 мм, по продольному – 50 мм) не наблюдается.

Как указывалось ранее, перемешивание расплава, полнота которого будет влиять на качество

стали происходит под действием струи по ходу долива и, далее, под действием затухающей вынужденной и естественной конвекций. Поэтому, для подтверждения полноты перемешивания, рассчитаны значения и построены скорости движения потоков расплава на различных горизонтах высоты слитка вблизи затвердевшего слоя у стенок изложницы при различной длительности долива (рис. 6 а) в конце наполнения слитка.

В случае долива длительностью 20 и 30 секунд на горизонтах 10 – 20 % высоты слитка вблизи твердой поверхности наблюдается поток с вертикальной составляющей скорости движения 1 и 1,5 мм/сек. А на горизонтах 75 – 100 % высоты слитка восходящий поток образуется для всех выбранных пяти значений скорости долива.

График зависимости влияния длительности долива на вертикальную составляющую скорости движения расплава представлен на рис. 6 б, где четко прослеживается некоторое увеличение скорости потоков в слитке с уменьшением длительности долива.

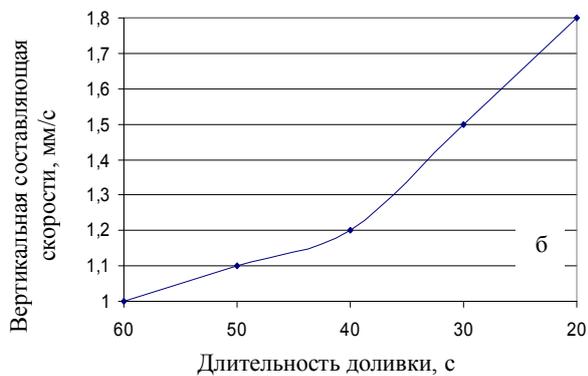


Рис. 6. Величина вертикальной составляющей скорости движения расплава на различных горизонтах высоты слитка в конце наполнения слитка при различной длительности долива (а) и влияние длительности долива на скорость вихря, образующегося на горизонте 1850 мм высоты слитка (б). Расстояние от стенки изложницы 60 – 75 мм.

Прослежено влияние массовой скорости разливки на интенсивность вертикальных составляющих скорости потоков, образующихся в осевой части слитка (рис. 7).



Рис. 7. Влияние массовой скорости разливки на интенсивность движения вертикальных составляющих потока металла в осевой части слитка на горизонте, % высоты слитка: а – 100; б – 97,8; в – 66; г – 6,5.

Так, показано, что с увеличением массовой скорости долива происходит рост интенсивности движения потоков от нескольких до 50 мм/с на уровне 100 – 150 мм от дна слитка. На горизонтах 66 %, 97,8 % и 100 % высоты слитка скорость потоков достигает значительно больших величин – от 20 – 30 мм/с для минимальной массовой скорости разливки металла – 10 кг/с, до 90 – 95 мм/с - для массовой скорости 29 кг/с.

Выводы. На основе результатов численного эксперимента по моделированию влияния основных параметров технологии разливки на условия затвердевания слитка установлено, что:

- температура первого расплава незначительно влияет на скорость движения потоков, но закономерно уменьшает толщину затвердевшего слоя с 45 – 60 мм до 30 – 45 мм (4 мин выдержки), с 75 – 90 мм до 60 – 75 мм (8 мин выдержки) и с 90 – 105 мм до 75 – 90 мм (12 минут выдержки), при температурах заливки 1773 К и 1873 К, соответственно;
- с точки зрения получения наиболее равномерного по высоте слитка наружного слоя толщиной 60 мм, оптимальными являются температуры 1793 – 1853 К и время выдержки 8 (±1) минут;
- увеличение времени выдержки приводит к росту толщины твердого слоя (при оптимальной температуре через 8 минут - 60 – 75 мм, через 12 минут – 75-90 мм), однако, чрезмерное утолщение его ограничивает допустимый интервал выдержки;
- показано активное проникновение струи доливаемого металла до дна слитка и, даже, подмыв нижнего затвердевшего слоя на глубину 15 мм с образованием лунки с максимальным радиусом 105 мм при длительности долива 30 с;
- в процессе залива в жидком объеме слитка возникают восходящие и нисходящие потоки и вихри, перемешивающие расплав. При этом восходящие потоки обнаружены вблизи затвердевшего слоя (на расстоянии от стенки изложницы 60 – 75 мм) на верхних горизонтах слитка для всех рассмотренных длительностей долива и на горизонтах 10 – 20 % высоты слитка для двух наиболее интенсивных вариантов организации процесса, что является

косвенным подтверждением полноты смешения расплавов.

Показано, что численные расчеты по математической модели в разработанной постановке задачи позволяют довольно точно определить толщину твердого слоя в каждый момент затвердевания слитка, что дает возможность установить оптимальный момент долива второго расплава. Показано, что движение потоков металла в жидкой сердцевине слитка при доливе достаточно интенсивно для обеспечения смешения двух расплавов.

Сравнение расчетных данных роста толщины твердой корки с результатами определения толщины слоев по закону квадратного корня показывает их удовлетворительное совпадение.

Двухэтапная модель затвердевания слитка с доловым может быть использована для прогнозирования времени формирования слоев заданной толщины, что позволит создавать новые варианты композиционных высоколегированных сталей, с целью экономии дорогостоящих легирующих элементов.

ЛІТЕРАТУРА

1. В.А. Лейбензон, Ф.В. Недопекин, В.М. Кондратенко и др. Затвердевание металлических композиций: производство и моделирование.- Донецк: ООО «Юго-восток, Лтд»,- 2005.- 231 с.
2. А.Н.Головачев, А.П. Стовпченко, В.Ю. Болотов, И.А. Павлюченков. Математическая модель сопряженной двухэтапной задачи гидродинамики и теплопереноса при формировании биметаллического слитка. Сообщение 1 // Математичне моделювання. - 2011. - №1(24). - С. 29-31.
3. А.Н. Головачев, И.В. Стовпченко, А.П. Стовпченко. Компьютерная методика прогнозирования хода затвердевания, состава и свойств внутреннего слоя литых композитных материалов // Компьютерное материаловедение и обеспечение качества. Одесса, 28 – 29 апреля, 2006 г. -Одесса, 2006.-С. 151-152.

пост. 21.12.2011

Напряженно-деформированное состояние составного цилиндра в нестационарном осесимметричном тепловом поле

НОВИКОВА О.С.

Запорожская государственная инженерная академия

Предлагается подход к решению осесимметричной задачи термоупругости, в котором решение нестационарной задачи теплопроводности и решение задачи теории упругости строятся в виде базисных функций, представленных через ультрасферические многочлены.

Пропонується підхід до вирішення осесимметричної задачі термопружності, в якому рішення нестационарної задачі теплопровідності і рішення задачі теорії пружності будуються у вигляді базисних функцій, представлених через ультрасферичні многочлени.

An approach to solving the axisymmetric problem of thermoelasticity in which the solution of nonstationary heat conduction problem and the solution of elasticity theory constructed in the form of basis functions represented by ultraspherical polynomials.

Введение. Наиболее распространенным подходом к решению задач о тепловой осесимметричной деформации цилиндра конечной длины является решение задачи теплопроводности путем интегральных преобразований Лапласа, что позволяет представить термоупругий потенциал перемещений через функции Бесселя [1]. В данной работе форма решений для температуры и соответствующих перемещений для случая осевой симметрии получена как частный случай пространственной задачи [2].

Представление решений для термоупругого потенциала перемещений. Температурное поле $T(x, y, z)$ приводит к возникновению перемещений в упругом теле, которые удовлетворяют уравнениям равновесия в перемещениях [1]

$$\nabla^2 u_\gamma + \frac{1}{(1-2\nu)} \frac{\partial e}{\partial \gamma} - 2 \frac{(1+\nu)}{(1-2\nu)} \alpha_T \frac{\partial T}{\partial \gamma} = 0, \quad (1)$$

$$e = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad \gamma = x, y, z$$

где ν и α_T — коэффициенты Пуассона и линейного расширения, соответственно.

Частное решение системы (1) в виде градиента термоупругого потенциала перемещений φ [1]

$$U^T = \text{grad} \varphi \quad (2)$$

устанавливает связь между температурой и потенциалом в форме

$$\nabla^2 \varphi = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_T T \quad (3)$$