

УДК 669.189

Сердюк И.А.¹, Данилов В.Л.²

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТРУИ НА ВЫСОТУ
ПОДЪЕМА ЖИДКОЙ СТАЛИ, НАТЕКАЮЩЕЙ НА СТЕНКУ
ИЗЛОЖНИЦЫ СО СТОРОНЫ ПОДДОНА ПРИ РАЗЛИВКЕ МЕТАЛЛА
СВЕРХУ**

Изложен алгоритм и разработана ЭВМ программа, позволяющая с помощью текст-ЭВМ программы Рунга-Кутты выполнить расчеты течения жидкой стали вдоль стенки изложницы со стороны поддона при разливке сверху. Установлена зависимость высоты подъема металла при реальных параметрах, учитывающих плотность жидкости, скорость и ширину потока струи.

Ключевые слова: динамика, кинетика, струя, профиль потока, численный метод, идеальная жидкость, плена.

Сердюк І.О. Данілов В.Л. Дослідження впливу параметрів струменя на висоту підйому рідкої сталі, яка натікає на стінку виливниці з боку піддона при розливанні металу зверху. Викладений алгоритм і розроблена ЕОМ програма, яка дозволяє за допомогою тексту ЕОМ програми Рунга-Кутта виконати розрахунки руху рідкої сталі вздовж стінки виливниці з боку піддону при розливанні сталі зверху. Встановлено залежність висоти підйому металу при реальних параметрах, які враховують щільність рідини, швидкість і ширину потоку струменя.

Ключові слова: динаміка, кінетика, струмінь, профіль потоку, чисельний метод, ідеальна рідина, плена.

I.A. Serdyuk, V.L. Danilov. Investigation of the influence of parameters of metal jet upon the height of liquid steel, flowing along the mould's walls from the bottom's side at top metal pouring. An algorithm was described and a computer program was developed, allowing by means of Rung-Kutt's text computer program to evaluate the flow of liquid d steel along the mould's wall from the bottom side at steel casting. Specified were the dependence of metal height at real parameters, taking into consideration liquid density, velocity and width of jet's flow.

Keywords: kinetics, jet's flow, numerical method, ideal liquid, sprayed metal spots.

Постановка проблемы. Режим заполнения расплавом изложниц определяет нежелательные последствия разливки сверху: приварка слитка к поддону, продольные трещины, корковые пузыри, плены на поверхности слитка и т.п.

Анализ последних исследований и публикаций. Теория и технология разливки стали исследованы во многих научных работах известных отечественных и зарубежных ученых. Весомый вклад в развитие этой проблемы внесли: Ефимов В.А., Недопекин Ф.В., Тимошкольский В.И., Жульев С.И., Смирнов А.Н., Дюдкин Д.А., Пилюшенко В.Л., Скобло С.Я., Козачков Е.А., Скребцов А.М., Латаш Ю.В., Яковлев Ю.Н., Огурцов А.П., Кон А., Оно А., Флеминге М. и др. Подробный анализ работ и результаты исследований по совершенствованию технологии разливки стали в изложницы приведены в книге «Крупный слиток», авторы: Смирнов А.Н., Макуров С.Л., Сафонов В.М., Цупрун А.Ю., изданной Донецким Национальным техническим университетом в 2009 году.

По мнению ученых технология разливки стали сверху включает следующие аспекты:

1. Проблемы скоростной разливки стали.
2. Проблемы совершенствования формы изложниц (слитков) и поддонов.
3. Проблемы повышения качества поверхности слитков и др.

Одними из основных факторов, определяющих качество слитка, являются кинетика и ди-

¹ канд. техн. наук, доцент, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь.

² д-р техн. наук, профессор, Московский государственный технический университет им. Н. Э. БауманаЮ, г. Москва.

намика струи расплава.

Цель статьи – На основе методов технической гидродинамики вязкой жидкости при различных исходных параметрах струи установить высоту подъема заплесков на стенку изложницы при соударении жидкой стали с поддоном на начальной стадии разлива.

Изложение основного материала. Процесс начальной стадии разлива жидкой стали в изложницу моделировали с помощью ЭВМ для установления высоты подъема заплесков на стенку изложницы при соударении струи жидкой стали с поддоном. Расчет динамики и кинетики струи осуществляли методами технической гидродинамики вязкой жидкости [1-3,5] при различных исходных параметрах струи.

В расчетах рассматривается, в установившемся режиме, заполнение сталью нижней части слитка при движении вверх вдоль вертикальной стенки изложницы. При перемещении расплава, согласно закону о постоянстве расхода, ее скорость уменьшается, а площадь сечения потока увеличивается. Такое свойство течения приводит к необходимости рассматривать не только вертикальную w , но и горизонтальную скорость u (рис. 1).

Профиль скоростей потоков (рис. 1) в течение некоторого времени непрерывно перемещается снизу вверх с поступлением в изложницу новых порций стали.

Необходимо подчеркнуть, что все приведенные ниже рассуждения справедливы только

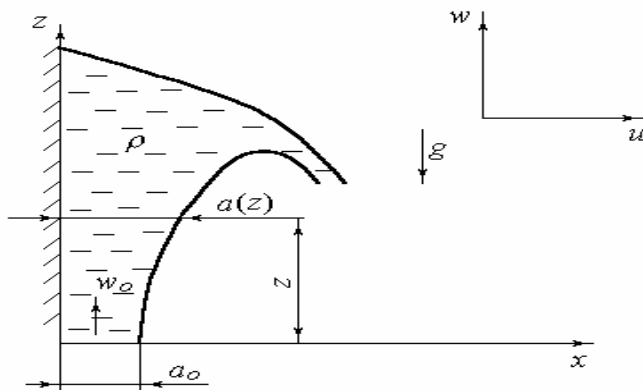


Рис. 1 – Профиль потока расплава жидкой стали при натекании ее на стенку изложницы в начальный момент разлива металла

для режима заполнения расплавом кюмпеля поддона и донной части слитка. Этот режим определяет следующие нежелательные последствия разлива сверху: приварка слитка к поддону, продольные и поперечные трещины, плены и корковые пузыри на поверхности слитка и т.п. В дальнейшем заполнение изложницы расплавом переходит в режим затопленной струи, при этом брызги металла и натекание его на стенку изложницы сильно ослабляются. Уравнение движения вязкой несжимаемой жидкости имеет вид [1, 2] (уравнение Навье-Стокса для установившегося движения).

$$\bar{v} \cdot \nabla \bar{v} = - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \Delta \bar{v} + \bar{g} \quad (1)$$

где \bar{v} - вектор полной скорости потока,

ρ - плотность жидкости,

p - давление,

μ - коэффициент вязкости.

В плоском случае $\bar{v} = \bar{i} u + \bar{k} w$ и (1) приобретает вид системы двух дифференциальных уравнений второго порядка

$$\begin{cases} u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \\ u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - g. \end{cases} \quad (2)$$

В случае идеальной ($\mu = 0$) жидкости удается построить довольно приближенное, но простое решение задачи об определении формы потока $a(z)$. Высоту подъема потока находят приближенно из условия $\frac{d a}{d z} \rightarrow \infty$.

При отсутствии вязкости уравнения движения упрощаются и принимают вид

$$\begin{cases} u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \\ u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g. \end{cases} \quad (3)$$

Вместе с условием неразрывности потока

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

эти уравнения составляют замкнутую систему.

Введем дополнительное предположение о постоянстве скорости w по горизонтальной координате

$$w = w(z), \quad (5)$$

тогда из (4) будет следовать

$$u = -x w'(z), \quad (6)$$

где штрихом помечено дифференцирование по z .

На границе потока (рис. 1) при $x = a(z)$ вектор скорости направлен по касательной к границе, т.е.

$$\left. \frac{u}{w} \right|_{x=a(z)} = \frac{d a}{d z}.$$

Подстановка (5) и (6) в последнее уравнение приводит к соотношению

$$- \frac{a w'}{w} = a'$$

или

$$(a w)' = 0$$

или

$$a w = Q, \text{ где } Q = const. \quad (7)$$

Соотношение (7) имеет смысл условия постоянства расхода.

Подставляя (5) и (6) в первое уравнение (3), получаем

$$- \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = x (w')^2 - x w w''.$$

Интегрируя это уравнение по x , находим

$$\frac{p}{\rho} = \left(\frac{a^2}{2} - \frac{x^2}{2} \right) [(w')^2 - w w'']. \quad (8)$$

Постоянная интегрирования в (8) выбрана из условия отсутствия избыточного давления на границе потока ($p|_{x=a} = 0$).

Подставляя все найденные величины во второе уравнение (3), получим

$$w w' = -a' a [(w')^2 - w w''] - \left(\frac{a^2}{2} - \frac{x^2}{2} \right) [(w')^2 - w w''] - g.$$

Для получения одномерного уравнения усредняем полученный результат по x от 0 до $a(z)$

$$w w' a = -a' a^2 [(w')^2 - w w''] - \frac{a^3}{3} [(w')^2 - w w''] - ga,$$

или

$$\frac{a^3}{3} \frac{d}{d z} [(w')^2 - w w''] = -a' a [(w')^2 - w w''] - w w' - g. \quad (9)$$

Уравнение (9) с учетом постоянства расхода (7) представляет собой разрешающее уравнение задачи. Интегрирование его выполняется численно методом Рунге-Кутты.

Выбор основных неизвестных для численного интегрирования сделаем следующим образом

$$\begin{aligned} y_1 &= w, \\ y_2 &= w', \\ y_3 &= (w')^2 - w w''. \end{aligned} \quad (10)$$

Тогда система уравнений для y_1, y_2, y_3 будет иметь вид

$$\begin{aligned} \frac{d y_1}{d z} &= y_2, \\ \frac{d y_2}{d z} &= -\frac{y_3 - y_2^2}{y_1}, \\ \frac{d y_3}{d z} &= \frac{3}{a^2} [-a a' y_3 - y_1 y_2 - g]. \end{aligned} \quad (11)$$

Причем

$$\begin{aligned} a &= \frac{Q}{w} = \frac{Q}{y_1}, \\ a' &= -\frac{Q}{w^2} w' = -\frac{Q}{y_1^2} y_2. \end{aligned}$$

Начальные условия для (11) будут следующими

$$y_1(0) = w_0 - \text{заданная скорость,}$$

$y_2(0) = 0$ - следует из $a'(0) = 0$, что означает наличие вертикальной касательной к границе жидкости в начале координат.

$$y_3(0) = \frac{p_0}{2 \rho a_0^2} - \text{следует из (8), где } p_0 - \text{ заданное давление в угловой точке (рис. 2).}$$

Вопрос о значении p_0 довольно сложен, но так как задача решается приближенно, то и этот вопрос допустимо также решать приближенно. В работе [1] выводится формула для реакции натекающей на плоскую стенку струи, из которой следует, что среднее давление струи на

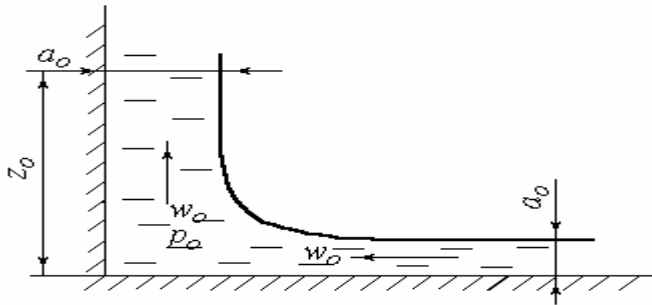


Рис. 2 – Профиль потока в начале заливки идеальной жидкости (расплав стали, принята вязкость $\mu = 0$) в литейную форму, угол поддона со стенкой изложницы

стенку равно ρw_0^2 - произведению плотности на квадрат скорости (в районе угла средняя горизонтальная скорость до угла равна средней вертикальной скорости после угла). Поэтому начальному условию для $y_3(0)$ можно придать вид

$$y_3(0) = \frac{1}{2} \left(\frac{w_0}{a_0} \right)^2.$$

На свободной границе давление отсутствует, поэтому и в массиве жидкости давление не очень сильно отличается от нуля.

Попытаемся, основываясь на этом, приближенно оценить вид кривой $a(z)$. Полагая в (8) $p \approx 0$ придем к

простому дифференциальному уравнению

$$(w')^2 - w w'' = 0$$

или

$$\left(\frac{w'}{w} \right)' = 0. \quad (12)$$

Из (12) следует

$$\begin{aligned} \frac{w'}{w} &= c_1, \\ w &= w_0 \exp(c_1 z). \end{aligned} \quad (13)$$

При $c_1 < 0$ скорость должна быстро убывать с увеличением h , а ширина потока $a(z)$ соответственно быстро расти по экспоненте.

Реальный процесс, конечно существенно сложнее решения (13). Он дается численным решением системы (11).

С этой целью разработана соответствующая ЭВМ программа, позволяющая проводить

расчеты течения жидкой стали при различных исходных параметрах струи. С помощью текст-ЭВМ программы Рунге-Кутты выполнены расчеты течения жидкой стали при следующих значениях параметров [3-6]: плотность $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³, скорость потока $w_0 = 10$ м/с, начальная ширина потока $a_0 = 0,2$ м. По результатам расчета на рисунке 3 приведена зависимость давления струи у стенки изложницы от высоты подъема стали.

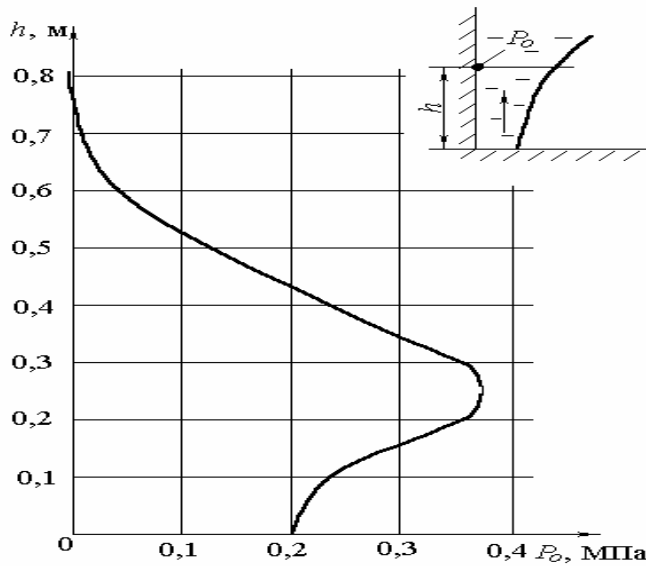


Рис. 3 – Зависимость давления у стенки изложницы от высоты подъема жидкости (стали)

Изменение знака давления произошло между высотами (z) 0,7136 м и 0,8155 м. Это означает, что отрыв потока от стенки происходит примерно на высоте 0,75 м. Именно этим определяется высота наплесков на стенку изложницы в данном случае разливки металла сверху.

Выводы

1. Сформулирована задача высоты подъема жидкой стали вдоль стенки изложницы в режиме начального заполнения расплавом нижней части изложницы. Этот режим определяет нежелательные последствия разливки металла сверху, основными из которых являются плены на поверхности грани слитка.
2. Получено дифференциальное уравнение для решения поставленной задачи при условии, что среда является идеальной жидкостью (вязкость $\mu = 0$). Для определения формы потока в реальных условиях вдоль стенки изложницы применен численный метод решения уравнения с помощью текст-ЭВМ программы Рунге-Кутты. Например, при плотности расплава $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³, скорость потока $w_0 = 10$ м/с и его начальной ширине $a_0 = 0,2$ м, высота заплесков металла составляет 0,75 м.

Список использованных источников:

1. Седов Л.И. Механика сплошной среды / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1970. – 573 с.
2. Кочин Н.Е. Теоретическая гидромеханика / Н.Е. Кочин, И.А. Кибель. – М.: Физматгиз, 1963. – Т.1.2.
3. Ефимов В.А. Исследование процессов гидродинамики и массопереноса при формировании стальных слитков / В.А. Ефимов // Проблемы стального слитка: труды V конференции по слитку. – М., 1974. – С. 17-33.
4. Гуляев А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1978. – 648 с.
5. Джаксон К.А. Жидкие металлы и их затвердевание: пер. с англ. / К.А. Джаксон. – М.: Металлургия, 1962. – 200 с.
6. Ван Флек Л. Теоретическое и прикладное материаловедение: пер. с англ. /Л. Ван Флек. – М.: Атомиздат, 1975. – 236 с.

Рецензент: А.М. Скребцов
 д-р техн. наук, проф. ПГТУ

Статья поступила 27.04.2010