А. Я. Пузиков, Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан, С. Б. Гаманюк, М. С. Никитин, Р. М. Войтенко

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА И СКОРОСТИ КОНВЕКТИВНЫХ ПОТОКОВ
ПРИ ФИЗИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ СЛИТКОВ***

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: tecmat@vstu.ru.

В работе описано применение теневого метода при физическом моделировании процесса затвердевания крупных слитков, для визуализации и количественной оценки конвективных потоков. В результате проведения эксперимента предложенная методика позволила визуализировать конвективные потоки во время разливки и затвердевания модельного слитка. На момент окончания разливки потоки представлены в виде вихревого перемещения, по мере дальнейшего затвердевания вид потоков изменяется на более равномерный, они имеют ламинарный характер, при этом визуализация их ухудшается. В начальные моменты времени скорость нисходящих потоков выше восходящих. Далее по мере продолжения затвердевания скорость нисходящих потоков уменьшается, а восходящих увеличивается. Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными, а также с промышленными экспериментами, что дает право считать данный метод исследования конвективного движения жидкости в слитке целесообразным для дальнейшего применения.

Ключевые слова: затвердевание, прямой теневой метод, физическое моделирование, конвективные потоки.

© Пузиков А. Я., Руцкий Д. В., Зюбан Н. А., Гаманюк С. Б., Никитин М. С., Войтенко Р. М., 2020

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-08-00050).

A. Ya. Puzikov, D. V. Rutskiy, N. A. Zyuban, Gamanuk S. B., M. S. Nikitin, R. M. Vojtenko

**DETERMINATION OF THE NATURE AND SPEED OF CONVECTIVE FLOWS
IN THE PHYSICAL SIMULATION OF THE PROCESS OF SOLIDIFICATION OF INGOTS**

Volgograd State Technical University

The paper describes in detail the application of the shadow method for physical modeling of the solidification process of large ingots, for visualizing and quantifying convective flows. As a result of the experiment, the proposed method allowed to visualize convective flows during casting and solidification of the model ingot. At the end of casting, the flows are represented as a vortex movement, as the further solidification of the flow changes to a more uniform appearance, they have a laminar appearance, while their visualization deteriorates. In the initial moments of time, the rate of descending flows is higher than the rate of ascending ones. Further, as the solidification continues, the rate of descending flows decreases, and the rate of ascending flows increases. The results obtained are in good agreement with the literature data, as well as with industrial experiments, which makes it possible to consider this method of studying the convective movement of a liquid in an ingot appropriate.

Keywords: solidification, direct shadow method, physical modeling, convective flows.

Затвердевание крупных кузнечных слитков в зависимости от их массы может достигать нескольких суток, при этом одновременно протекает множество физических и химических процессов, влияющих на образование и развитие в затвердевшем металле физической и химической неоднородностей. Ведущая роль при затвердевании слитка принадлежит тепловым процессам, так как именно они обуславливают особенности структуры и ликвационной неоднородности металла. Конвективное перемещение металла в изложнице относится к одному из важнейших явлений, влияющему на интенсивность теплопередачи от перегретых объемов стали к границе затвердевания. Этот процесс определяет скорость продвижения фронта затвердевания, перераспределение индивидуальных кристаллов, распределение неметаллических включений в слитке и расположение ликвационных полос в нем, поэтому изучение этого явления и по сей день является актуальной задачей. До настоящего времени в 1980-х годах конвекцию и особенности структурообразования металлического расплава изучали методом введения радиоактивных изотопов [1–3]; данный метод позволяет получить картину распределения конвективных потоков, а также данные о закономерности продвижения твердой и твердо-жидкой фаз. Однако недостатком данного метода является то, что изотоп не проникает в двухфазную зону и фиксирует только объем жидкой фазы. Метод введения радиоактивных изотопов является достаточно трудоемким и связан в большинстве случаев со значительными материальными затратами, кроме того не является экологичным.

В настоящее время для проведения предварительных исследований процесса затвердевания слитков пользуются методами моделирования.

Для описания процессов затвердевания широкое распространение получают методы математического [4, 5] и физического моделирования [6–9]. Каждый из существующих методов имеет свои преимущества и недостатки, например, при математическом моделировании процесс затвердевания описывается применяемыми математическими моделями, результат расчета в которых зависит от объективно заданных граничных условий. Кроме того, несмотря на активную рекламу производителей программного обеспечения, существующие комплексы не могут одновременно учитывать множество процессов, происходящих одновременно при затвердевании крупного слитка. Физическое моделирование позволяет наглядно определить кинетику процесса продвижения твердой и твердо-жидкой фаз, при одновременном протекании процессов конвективного перемешивания металлического расплава. Для описания процессов затвердевания методами физического моделирования авторами [8, 9] в качестве моделирующего вещества используется хлорид аммония NH_4Cl . Одним из недостатков использования данного вещества является необходимость создания отрицательных температур, что приводит к созданию значительного температурного градиента. В отечественной практике в качестве моделирующего раствора используется натрий серноватистокислый (кристаллический гипосульфит) – $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \times 5\text{H}_2\text{O}$. Температура начала затвердевания находится в пределах 48–52 °С. Кроме того, расчет критериев подобия (Bi, N, Fo, Fr, We) для данного вещества показал, что они находятся в одном порядке, как и для стали.

В связи с этим целью настоящей работы являлось определение скорости конвективных потоков при физическом моделировании процессов затвердевания слитков.

Моделирование процессов затвердевания слитков проводили на плоских моделях изложниц [10–12]; в качестве моделирующего раствора использовался натрий серноватистоокислый (кристаллический гипосульфит) – $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \times 5\text{H}_2\text{O}$.

Адекватность физического моделирования обеспечивалась одинаковым порядком чисел подобия, полученных в результате расчетов (см. табл. 1). Параметры моделируемых слитков приведены в табл. 2.

Таблица 1

Значения критериев подобия в образце и модели

Тип слитка	Критерий подобия				
	Bi	N	Fo	Fr	We
Модель слитка	$1,02 \cdot 10^{-8}$	0,52	$1,083 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$7,56 \cdot 10^{-4}$
Реальный слиток	$1,73 \cdot 10^{-7}$	4,01	$6,34 \cdot 10^{-4}$	$3,67 \cdot 10^{-5}$	$5,83 \cdot 10^{-3}$

Изучение влияния скорости и способа разлики, а также теплофизических явлений, происходящих при затвердевании, на качественные и количественные характеристики конвективного движения расплава проводилось на основе физического моделирования с применением прямого теневого метода. Суть прямого теневого метода состоит в том, что с помощью светового источника и собирающей линзы генерируется параллельный пучок света, которым «просвечивают» исследуемый объект. При наличии

неоднородности совокупность отклоняемых ею лучей формирует изображение, которое проецируется на экран.

В нашем исследовании для достижения параллельности светового пучка направляли свет на прямое зеркало. Размер зеркала соизмерим с размером кристаллизатора. Отраженный зеркалом свет от источника, проходя через модель, дает изображение неоднородности на экране. Это изображение фиксировалось с помощью цифровой видеокамеры высокого разрешения (см. рис. 1).

1 - Точечный источник света; 2 - Направление светового потока; 3 - Линза для формирования параллельного светового пучка; 4 - Кристаллизатор; 5 - Экран; 6 - Камера высокого разрешения.

Рис. 1. Установка для исследования конвективного движения жидкости при затвердевании модельного слитка

Для расчета скоростей конвективных потоков на экран была нанесена сетка с величиной стороны квадрата 25 мм.

Модель кристаллизатора изложницы представляла собой плоский алюминиевый кристал-

лизатор, имеющий форму внутреннего контура слитка. Внутри кристаллизатора находились технологические отверстия для подвода охлаждающей жидкости (воды). Она подавалась равномерно в обе стенки кристаллизатора для обес-

печения равномерного теплоотвода. С боковых сторон пространство между стенками кристаллизатора закрывалось органическим стеклом.

Геометрические параметры реального промышленного и модельного слитков представлены в табл. 2.

Таблица 2

Геометрические параметры реального и модельного слитков

Параметры слитков	Реальный слиток (19,6 т)	Модель
Отношение высоты к среднему диаметру H/D	2,15	2,3
Конусность тела слитка ($K_{т.сл}$), %	4,1	4,4
Конусность прибыльной надставки ($K_{пр}$), %	14,7	14,7
Объем тела слитка ($V_{т.сл}$), %	77,4	79,7
Объем прибыльной части слитка ($V_{пр}$), %	18	15,7
Объем донной части слитка ($V_{дон}$), %	4,6	4,5

Разливка металла в изложницу-кристаллизатор осуществлялась двумя способами – сверху и сифоном. Характеристика условий проведения экспериментов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристика условий проведения эксперимента

Параметр	Значение
Температура заливаемого гипосульфита, °C	91±5
Температура охлаждающей жидкости, °C	7
Диаметр разливочного стакана, мм	6
Масса расплава, г	685
Давление в системе охлаждения, кПа	98,07

В результате обработки полученных данных были построены зависимости скорости конвективного движения расплава от времени затвердевания модельного слитка.

Сразу после окончания заливки расплава в изложницу в теле слитка наблюдается вихревое движение потоков жидкости (см. рис. 2, а). Скорость таких потоков составляет 0,025 м/с, а время их существования – около 2 минут (см. рис. 3). После истечения этого времени характер движения конвективных потоков меняется на ламинарный (см. рис. 2, б), при этом интенсивность их снижается, а визуализация ухудшается (см. рис. 2, б; 3). Во время окончания затвердевания наблюдается улучшение визуализации конвективных потоков (см. рис. 2, в), при этом видно пиковые увеличения, скорость потоков возрастает (см. рис. 5).

2 мин после разливки

70 мин после разливки

140 мин после разливки

Рис. 2. Конвективное движение расплава во время затвердевания слитка

На начальных этапах процесса затвердевания видно, что скорость нисходящих потоков выше, чем восходящих (см. рис. 3). Это связано с тем, что на момент окончания разливки в прибыльной части слитка температура расплава остается высокой еще длительное время. Из-за соприкосновения «горячего» моделирующего расплава с «холодными» стенками

изложницы кристаллизатора ввиду значительного теплоотвода от стенок и дна изложницы возникает значительный температурный градиент, что приводит к интенсивному конвективному движению, которому также способствует различная плотность «горячего» в верхней части и «холодного» в нижней части слитка.

Рис. 3. Скорости потоков на начальном этапе затвердевания модельного слитка

Рис. 4. Зависимость скорости восходящих и нисходящих конвективных потоков от времени затвердевания модельного слитка

Сопоставление скоростей восходящих и нисходящих потоков (см. рис. 4) показало, что при затвердевании 40 % слитка (50 мин) скорость нисходящих потоков выше, чем восходящих, что обусловлено охлаждающим воздействием стенок изложницы-кристаллизатора. Далее, по мере затвердевания и нарастания твердой фазы, интенсивность продвижения твердой фазы снижается, что приводит к сни-

жению температурного градиента, выравниванию и снижению температуры в жидкой незатвердевшей части и, как следствие, снижению скорости нисходящих потоков (см. рис. 4). При окончании затвердевания последних порций металла скорость восходящих потоков возрастает, это связано с «работой» прибыльной части слитка, в которой металлический расплав находится в «горячем» состоянии. Кроме того,

увеличение скорости восходящих потоков вызвано выделением скрытой теплоты кристаллизации во время затвердевания слитков, последних затвердевающих объемов (см. рис. 2, в).

Для проверки достоверности полученных результатов измерения скорости конвективных потоков было проведено сравнение изменения полученных скоростей (см. рис. 5, а) с данными в работе [3], полученными методом радиоактивных изотопов для слитка массой 40 т (см. рис. 5, б). Из сравнения видно, что динамика изменения скорости потоков одинаковая (при этом наблюдается небольшое повышение ско-

ростей в реальном слитке). Абсолютное изменение скоростей потоков для реального слитка отличается на один порядок, что вызвано различной массой. В работе моделировали слиток исходя из геометрического подобия слитка массой 19,6 т, сравнивали с данными измерения скорости реального слитка массой 40 т. Полученные результаты хорошо соотносятся с результатами промышленных экспериментов, что дает право считать данный метод исследования конвективного движения жидкости в слитке целесообразным для дальнейшего применения.

Рис. 5. Средняя скорость движения конвективных потоков в зависимости от времени затвердевания слитка, полученная физическим моделированием (а) и методом радиоактивных изотопов (б) в слитке массой 40 т

Выводы

Применение прямого теневого метода на холодной модели изложницы позволило визуализировать, а также количественно оценить характер и скорость изменения конвективных потоков во время затвердевания модельного слитка. Установлено, что на момент окончания разливки в течение 2 минут (2 % от времени затвердевания) потоки представлены в виде вихревого перемещения, по мере дальнейшего затвердевания вид потоков изменяется на более равномерный, они имеют ламинарный вид, при этом визуализация их ухудшается. Оценка скорости потоков показала, что в начальные моменты времени (при затвердевании 40 % слитка), скорость нисходящих потоков выше восходящих. Далее по мере продолжения затвердевания скорость нисходящих потоков уменьшается, а восходящих увеличивается.

Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными, а также с промышленными экспериментами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ефимов, В. А. Разливка стали в слитки / В. А. Ефимов // Формирование стального слитка. – М. : Металлургия. – 1986. – С. 6–13.
2. Ефимов, В. А. Современные технологии разливки и кристаллизации сплавов / В. А. Ефимов, А. С. Эльдарханов. – М. : Машиностроение, 1998. – С. 359.
3. Скребцов, А. М. Конвекция и кристаллизация металлического расплава в слитках и отливках / А. М. Скребцов. – М. : Металлургия, 1993. – С. 143.
4. Определение геометрии слитков с минимальным развитием дефектов осевой зоны и их применение для получения сортового проката диаметром более 300 мм / Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан, С. Б. Гаманюк [и др.] // Металлург. – 2018. – № 11. – С. 33–39.
5. Влияние геометрии слитка на объем осевой рыхлости в нем / А. Н. Ромашкин [и др.] // Компьютерные исследования и моделирование. – 2015. – Т. 7. – № 1. – С. 107–112.

6. Эльдарханов, А. С. Процессы формирования отливок и их моделирование / А. С. Эльдарханов, В. А. Ефимов, А. С. Нурадинов. – М. : Машиностроение, 2001. – 208 с.

7. Анализ кинетики затвердевания стальных кузнечных слитков различной конфигурации. Ч. I. Результаты холодного моделирования / В. С. Дуб [и др.] // *Металлург.* – 2015. – № 11. – С. 41–56.

8. Massive Formation of Equiaxed Crystals by Avalanches of Mushy Zone Segments / A. Ludwig, M. Stefan-Kharicha, A. Kharicha and M. Wu // *Metallurgical and materials transaction A*. 2017. Volume 48A. P. 2927–2930.

9. Review of Ammonium Chloride-Water Solution Properties / M. Stefan-Kharicha, A. Kharicha, J. Mogeritsch, M. Wu

and A. Ludwig // *Journal of chemical and engineering*. 2018. Volume 63. P. 3170–3183.

10. Пат. 110667 РФ, МПК В 22 D 7/08. Устройство для исследования процесса кристаллизации слитков в модели изложницы / Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий, С. Б. Гаманюк, С. Н. Никуйко, А. Н. Галкин ; ВолгГТУ. – 2011.

11. Пат. 135551 РФ, МПК В22D7/08. Модель изложницы для исследования процесса кристаллизации слитков / Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий, А. Н. Галкин, С. Б. Гаманюк, Е. А. Косова, А. Я. Пузиков ; ВолгГТУ. – 2013.

12. Пат. 141550 РФ, МПК В22D7/08. Модель изложницы для исследования процесса кристаллизации слитков / Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий, А. Н. Галкин, С. Б. Гаманюк, Е. А. Косова, А. Я. Пузиков ; ВолгГТУ. – 2014.