

УДК 669-412:519.87

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ СЛИТКА НА ОСОБЕННОСТИ ЕГО ЗАТВЕРДЕВАНИЯ НА ОСНОВЕ ХОЛОДНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ. Часть I

© Ромашкин Александр Николаевич, канд. техн. наук; Толстых Дмитрий Сергеевич;

Мальгинов Антон Николаевич; Дуб Владимир Семенович, д-р техн. наук, проф.

ОАО НПО «ЦНИИТМАШ». Россия, Москва. E-mail: an_romashkin@cniitmash.ru

Статья поступила 27.01.2013 г.

Это первая из трех статей, посвященных исследованию влияния геометрии слитка на особенности его затвердевания на основе холодного моделирования. В первой части подробно изложены методика эксперимента, расчет критериев подобия и устройство лабораторной установки.

Ключевые слова: стальной слиток; холодное моделирование; затвердевание (кристаллизация).

Часть I. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Моделирование процессов затвердевания жидкого расплава на холодных физических моделях – широко распространенный метод исследования в лабораторной практике. Относительная простота, возможность широкого варьирования различных параметров процесса, наглядность, а также воспроизводимость результатов – это те достоинства метода, которые всегда привлекали внимание исследователей. Холодное моделирование позволяет прогнозировать поведение слитка при кристаллизации, проводить большие серии экспериментов с разными параметрами без крупных затрат. Однако ввиду сложности протекания реальных процессов в металле невозможно достаточно точно идентифицировать их на модели, поэтому полученные на холодных моделях результаты в основном носят качественный характер и могут быть использованы лишь для относительного сравнения результатов изменения технологических параметров.

В ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» холодное моделирование использовали для изучения процесса влияния геометрии слитка на особенности его затвердевания, в том числе на формирование осевой физической неоднородности (осевой рыхлости).

С целью повышения информативности холодного моделирования в ходе экспериментов применяли средства тепловизионного контроля, благодаря которым была обеспечена возможность определять температуру по всей поверхности модели в режиме реального времени.

В работе было исследовано девять моделей слитка массой 235 т в масштабе 1:25. В моделях

изменяли параметры H/D в пределах от 1 до 2 и конусности K от 2 до 18 с шагом 0,5 и 8 соответственно (рис. 1). Параметры созданных моделей приведены в табл. 1. Массовая доля прибыльной части была постоянна – 20%, массовая доля кюмпеля – 7%. Выбор такого слитка обусловлен тем, что в ЦНИИТМАШе традиционно разрабатывают комплексные, в том числе относящиеся к металлургическому переделу, технологии для атомного машиностроения, а слиток такой массы может потребоваться для изготовления деталей корпуса перспективного атомного реактора ВВЭР-ТОИ.

В ходе экспериментов оценивали изменение температуры на поверхности изложницы во времени, толщину затвердевающей корочки, скорость кристаллизации, время полного затвердевания, форму жидкой ванны.

Модель изложницы [1] представляла собой выполненные из свинца неразъемные боковые стенки и поддон, закрываемые с двух сторон двумя листами органического стекла. Для обеспечения герметичности между листами органиче-

Таблица 1. Параметры модельных слитков, использованных при моделировании

Номер слитка	H/D	K	H , мм	$D_{\text{верх}}$, мм	$D_{\text{нижн}}$, мм
1	1	2	129	130	127
2	1	10	129	135	122
3	1	18	129	140	117
4	1,5	2	165	112	108
5	1,5	10	165	118	102
6	1,5	18	165	125	95
7	2	2	200	102	98
8	2	10	200	110	90
9	2	18	200	118	82

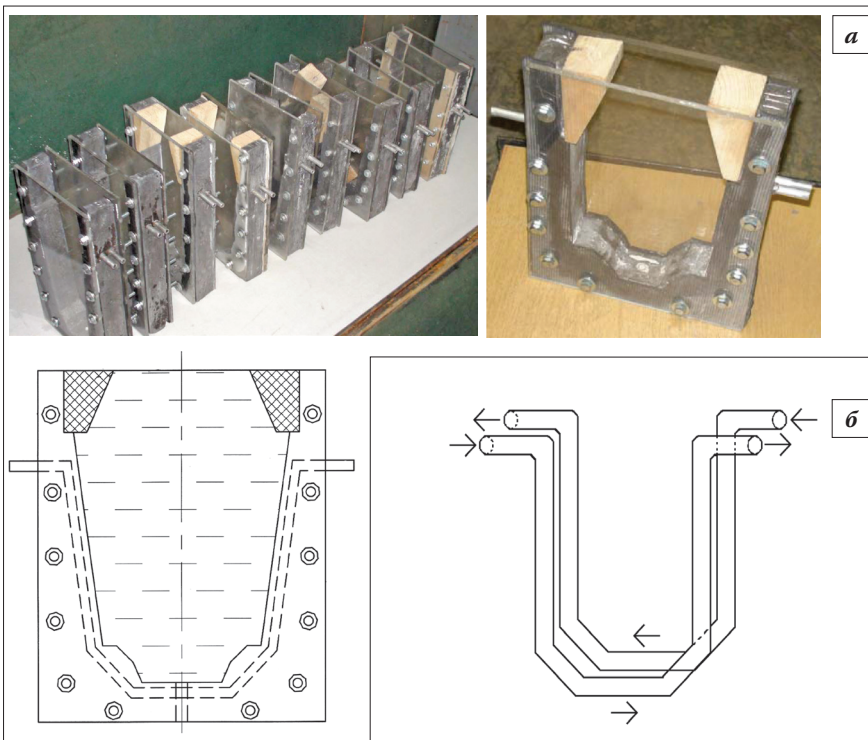


Рис. 1. Фото и схема использованных в работе моделей изложниц (а) и схема их охлаждения (б)

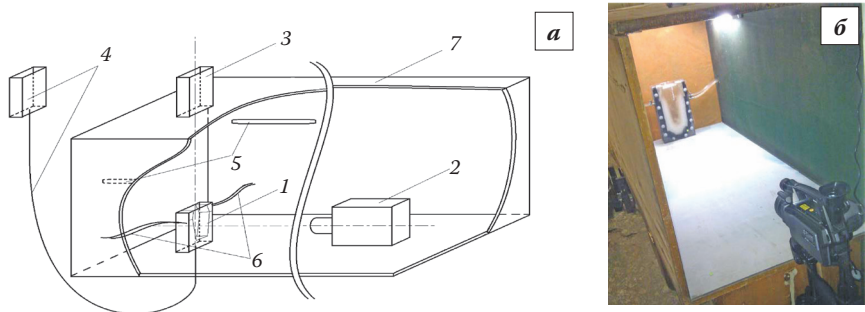


Рис. 2. Схема (а) и фотография (б) лабораторной установки: 1 – модель изложницы; 2 – регистрационное оборудование; 3, 4 – промежуточные ковши для заливки сверху и снизу; 5 – лампы освещения; 6 – трубки водяного охлаждения; 7 – корпус

ского стекла и свинцовым каркасом размещали резиновую прокладку. Внутри стенок и в поддоне были выполнены две водоохлаждаемые полости с возможностью подачи воды с двух сторон изложницы (см. рис. 1, б). Необходимость двухсторонней подачи обусловлена стремлением обеспечить симметричность охлаждения изложницы: при односторонней подаче тепловой центр мог сместиться к стенке модели изложницы, противоположной той, со стороны которой подают воду.

В качестве теплоизоляции прибыльной части модельных слитков использовали деревянные вставки (см. рис. 1, а).

Лабораторная установка (рис. 2) представляла собой короб размерами 650×650×1300 мм. С одного края в боковых стенках были выполнены по

два отверстия с каждой стороны для вывода гибких водоотводящих шлангов, а также по одному отверстию снизу и сверху для обеспечения возможности донной заливки и заливки сверху соответственно. Со стороны модели устанавливали две лампы для обеспечения стабильного освещения во время эксперимента. С другой стороны короба устанавливали оборудование для съемки и тепловизионное. Сверху, вне короба, был установлен промежуточный ковш для заливки жидкости сверху и позади короба – промежуточный ковш и трубопровод для донной заливки.

В качестве среды, моделирующей затвердевающий металлический расплав, использовали кристаллический гипосульфит ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).

Соответствие моделирующего и моделируемого процессов разлива и кристаллизации проверяли с помощью критериев подобия Фруда, Рейнольдса и Вебера. Первый показывает соотношение сил инерции и тяжести в потоке; второй характеризует гидродинамический режим течения потока (ламинарный или турбулентный) и критерий Вебера характеризует соотношение сил инерции потока и по-

верхностного натяжения жидкости

$$\text{Fr} = \omega^2/(gl), \tag{1}$$

$$\text{Re} = (\omega l)/\nu, \tag{2}$$

$$\text{We} = (\rho\omega^2)l/\sigma, \tag{3}$$

где ω – скорость потока разлива, м/с; g – гравитационная постоянная, м/с²; l – характерный геометрический размер, м; ν – кинематическая вязкость, м²/с; ρ – плотность, кг/м³; σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м.

Кроме этого для полноты исследования рассматриваемых процессов дополнительно вводили критерии Био (Bi), фазового перехода (N) и Фурье (Fo) [2].

Критерий Bi описывает характер соответствия между температурными условиями в окружающей среде и распределением температуры в

Таблица 2. Теплофизические и физические параметры моделируемой и моделирующей сред [3]

Параметр	Сталь	Гипосульфит
Скорость потока (линейная скорость разливки) ω , м/с	7,85	4,75
Удельная теплота затвердевания Q , кДж/кг	267,5	154,3
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м·К	21,1*/23,6	0,93/0,8
Средняя массовая теплоемкость C_p , кДж/м·К	0,5/0,75	2,72/3,26
Плотность ρ , кг/м ³	7800/7200	1880/1750
Температуропроводность α , м ² /с	$6,3 \cdot 10^{-6}/4,4 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-8}/16,7 \cdot 10^{-8}$
Гравитационная постоянная g , м/с ²	9,8	9,8
Перепад температур между поверхностью отливки и фронтом затвердевания ΔT , °С	600	40
Коэффициент кинематической вязкости ν , м ² /с	$6,3 \cdot 10^{-7}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент объемного поверхностного натяжения σ , Н/м	1,761	0,03

* Числитель – затвердевшая среда; знаменатель – расплав.

теле. Критерий затвердевания (фазового перехода) N описывает отношение теплоты фазового перехода к теплоте охлаждения. Критерий гомохронности Fo описывает время для нестационарного теплообмена

$$Bi = \alpha l_0 / \lambda, \quad (4)$$

$$N = C_p \Delta T / Q, \quad (5)$$

$$Fo = \alpha t / l_0, \quad (6)$$

где α – коэффициент температуропроводности, м²/с; l_0 – определяющий размер, м; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); C_p – средняя массовая теплоемкость, кДж/(кг·К); ΔT – перепад температур между фронтом затвердевания и поверхностью отливки, °С; Q – удельная теплота затвердевания, кДж/кг; t – время затвердевания, с.

Условием оптимизации значений полученных критериев было соблюдение отношения:

$$\text{Критерий модели} / \text{Критерий слитка} = 1. \quad (7)$$

Исходные для расчета данные приведены в табл. 2, результаты расчета – в табл. 3.

Как видно, значение большинства критериев подобия для модельного и реального слитков не отличается больше чем на один порядок, что можно считать приемлемым. Значительное расхождение отмечается только для критерия Био, что говорит о плохом соответствии температур-

Таблица 3. Значения критериев подобия в модели и образце

Критерий подобия	Значение критерия		Отношение по (7)
	для модели	для реального слитка	
Bi	$3,14 \cdot 10^{-6}$	$1,64 \cdot 10^{-4}$	0,019
N	$4,47 \cdot 10^{-1}$	$2,43 \cdot 10^0$	0,184
Fo	$2,55 \cdot 10^{-4}$	$1,64 \cdot 10^{-4}$	1,55
Fr	$6,14 \cdot 10^1$	$1,26 \cdot 10^1$	4,87
Re	$1,81 \cdot 10^7$	$3,35 \cdot 10^7$	0,54
We	$1,26 \cdot 10^4$	$3,22 \cdot 10^4$	0,39

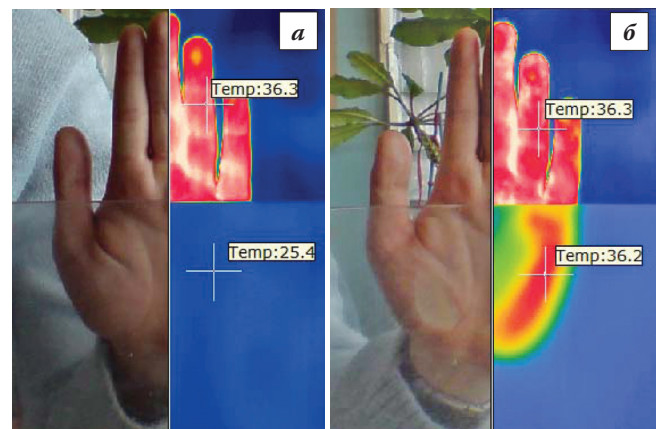


Рис. 3. Пример тепловой инерции плексигласа: а – начало съемки; б – через 2 мин

ных условий в моделируемом и моделирующем слитках. Однако близость значений большинства критериев подобия позволяет считать данное моделирование представительным.

Для измерения температуры использовали тепловизор FLIR SC640. Особенностью применения тепловизионных средств контроля температуры является возможность измерения температуры только на поверхности, поэтому полученные результаты измерения температуры следует относить к температуре внешней поверхности плексигласовой пластины. При этом предварительная отработка методики эксперимента показала, что внешняя поверхность листа плексигласа толщиной 5 мм достигает температуры контактирующей с внутренней поверхностью нагревающей среды через 1–2 мин (рис. 3). Это имеет значение только на начальных этапах моделирования при изучении быстрых гидродинамических потоков, когда длительность исследуемых актов сопоставима с этим временем. Но в целом, учитывая то, что продолжительность эксперимента составляла более 3 ч, можно считать, что данная температурная задержка не вносит значительных искажений в получаемые результаты.

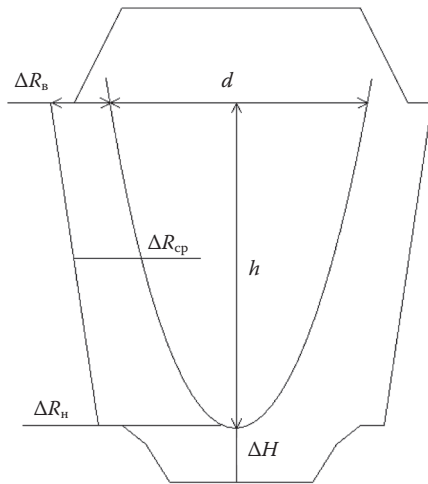


Рис. 4. Измеряемые параметры твердой корочки слитка при изучении его затвердевания

Параметры эксперимента:

Расход воды, подаваемой для охлаждения изложницы	Около 4,5 л/мин
Температура расплава гипосульфита натрия	65±5 °С
Температура подводимой воды	12 °С
Диаметр заливочного отверстия в промежуточной ковше при разливке сверху и в донной части изложницы при разливке снизу	8 мм
Время наполнения изложницы выдерживали в пределах	30–45 с
Масса расплава	2,2–2,5 кг

Для обработки тепловизионных снимков применяли компьютерную программу FLIR Reporter.

С целью обеспечения симметричности затвердевания при проведении эксперимента разливочную оснастку (ковш и изложницу) центрировали с помощью отвеса. Видео- и тепловизионную съемку проводили в режиме одновременного получения фото- и термоснимков через заданные интервалы времени: в первые 5 мин через 30 с; в следующие 10 мин через 1 мин; до окончания первого часа кристаллизации через 5 мин, затем интервал между снимками был равен 20 мин вплоть

до завершения процесса затвердевания. Фото и видеосъемку запускали сразу после окончания заливки. Эксперимент с каждой из изложниц проводили два раза: с донной и верхней заливкой.

Продолжительность одного эксперимента составляла 4,5–6 ч. При обработке видеoinформации определяли размеры закристаллизовавшегося слоя по четырем направлениям: $\Delta R_{\text{в}}$ – толщина слоя сверху слитка; $\Delta R_{\text{сп}}$ – толщина слоя на уровне середины слитка; $\Delta R_{\text{н}}$ – толщина слоя снизу слитка; ΔH – толщина слоя от дна по оси слитка (рис. 4).

В качестве количественного критерия, позволяющего оценить влияние геометрии слитка на особенности его затвердевания, был выбран безразмерный параметр $k = d/h$ – отношение верхнего диаметра d жидкой лунки к ее глубине h (см. рис. 4). При увеличении значений параметра k вероятность образования осевой рыхлости будет уменьшаться. Это объясняется тем, что с уменьшением глубины лунки (с увеличением k) уменьшается вероятность образования перемычек твердого металла, изолирующих макрообласти жидкого металла в осевой части слитка и, соответственно, ухудшающих условия подпитки осевой зоны расплавом из верхней части слитка.

После определения значений $\Delta R_{\text{в}}$; $\Delta R_{\text{сп}}$; $\Delta R_{\text{н}}$; ΔH для каждого из слитков были рассчитаны скорость кристаллизации и искомый параметр k . Результаты проведенных экспериментов будут опубликованы в следующих номерах журнала.

Библиографический список

1. Заявка 2013147670 РФ, МПК В22D11/00. Устройство для моделирования процесса кристаллизации расплава в изложнице / Дуб В.С., Ромашкин А.Н., Толстых Д.С., Мальгинов А.Н., Иванов И.А. – реш. о выд. пат. 12.02.2014.
2. Исаев С.И., Кожин И.А. Кофаров В.И. и др. Теория теплообмена. М.: Высшая школа, 1979. 495 с.
3. Эльдарханов А.С., Ефимов В.А., Нуратдинов А.С. Процессы формирования отливок и их моделирование. М.: Машиностроение, 2001. 208 с.

STUDY OF INFLUENCE OF INGOT GEOMETRY ON CHARACTERISTICS OF ITS SOLIDIFICATION ON BASE OF COLD SIMULATION. Part I

© Romashkin A.N., Cand. Sci. (Eng.); Tolstykh D.S.; Malginov A.N.; Dub V.S., Dr Sci. (Eng.), prof.

This article is the first of three articles devoted to the study of the influence of geometry on the characteristics of the ingot solidification based on cold simulation. In the first part the experimental method is described in detail as well as the calculation of the similarity criteria and laboratory unit device.

Keywords: steel ingot; cold simulation; solidification (crystallization).