

6. Гиршович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. – М.: Машиностроение, 1966. – 562 с.
7. Ващенко К. И., Шумихин В. С. Плавка и внепечная обработка чугуна для отливок. – Киев: Вища школа, 1992. – 246 с.
8. Чугун: Справочник / Под ред. А. Д. Шермана, А. А. Жукова. – М.: Metallurgy, 1991. – 576 с.
9. Медь в высокопрочном чугуне / В. Б. Бубликов, А. А. Ясинский, Л. Н. Сыропоршнев и др. // Процессы литья. – 2010. – № 3 (81). – С. 46-57.

Поступила 06.09.2010

УДК 621.74.047:594.1:62-412

А. С. Нурадинов, Е. Д. Таранов, А. С. Эльдарханов*

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

*Научный центр «Новейшие материалы и технологии», Москва

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИИ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ

На камфене и алюминии изучено влияние вибрации на теплофизические условия формирования непрерывнолитых заготовок. Установлено, что наложение виброимпульса на кристаллизатор и заготовку усиливает теплоотвод от затвердевающего слитка как в зоне кристаллизатора, так и зоне вторичного охлаждения. Показана аналогия между теплофизическими условиями формирования модельных и натуральных заготовок.

Ключевые слова: теплофизические условия, непрерывнолитые заготовки, виброимпульс, кристаллизатор, теплоотвод.

На камфені та алюмінії вивчено вплив вібрації на теплофізичні умови формування безперервнолитих заготовок. Встановлено, що накладання віброімпульса на кристалізатор і заготовку підсилює тепловідвід від тверднучого зливка як в зоні кристалізатора, так і зоні вторинного охолодження. Показана аналогія між теплофізичними умовами формування модельних і натурних заготовок.

Ключові слова: теплофізичні умови, безперервнолітні заготовки, віброімпульс, кристалізатор, тепловідвід.

On kamfene and aluminum studied vibration influence on thermalphysic formation conditions continuously cast preparations. It is established that imposing vibrations impulse on a crystallizer and preparation strengthens a heatconducting path from a hardening ingot both in a crystallizer zone, and in a zone of secondary cooling. The analogy between thermalphysic conditions of formation of modeling and natural preparations is shown.

Keywords: thermalphysic formation, continuously cast preparations, vibration impulse, crystallizer, heat conducting.

Качество непрерывнолитых заготовок (НЛЗ), главным образом, зависит от двух основных параметров: интенсивности теплоотвода и, как следствие, от скорости кристаллизации сплава. Поэтому попытки использования различных внешних воздействий при непрерывном литье связаны, в том числе, с задачей оптимизации теплообменных процессов в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения (ЗВО), то есть теплофизических условий формирования НЛЗ.

Кристаллизация и структурообразование сплавов

В данной работе методом физического моделирования и на реальной заготовке из алюминиевого сплава изучено влияние вибрации на теплофизические условия формирования НЛЗ.

В качестве теоретической предпосылки для анализа результатов рассмотрим некоторые принципиальные особенности теплообменных процессов, происходящих в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения, потому что именно в этих зонах происходит начальное формирование и окончательное затвердевание НЛЗ.

Если рассматривать кристаллизатор как теплообменный аппарат, то тепловой баланс его будет иметь вид [1]

$$Q_{\text{нач}} = Q_{\text{в}} + Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_{\text{ух}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{нач}}$ – тепло, вносимое жидким металлом в кристаллизатор, кДж; $Q_{\text{в}}$ – тепло, отводимое охлаждающей водой в кристаллизаторе; Q_1 – потери тепла на лучеиспускание через поверхность металла; Q_2 – потери тепла через наружные стенки кристаллизатора; Q_3 – потери тепла на начальный прогрев кристаллизатора; $Q_{\text{ух}}$ – тепло, уходящее из кристаллизатора с непрерывным слитком.

Учитывая, что потери тепла Q_1 , Q_2 и Q_3 незначительные, по сравнению с $Q_{\text{в}}$ и $Q_{\text{ух}}$, ими пренебрегают и считают

$$Q_{\text{нач}} = Q_{\text{в}} + Q_{\text{ух}}. \quad (2)$$

Тепло, вносимое жидким металлом в кристаллизатор, можно определить по формуле [2]

$$Q_{\text{нач}} = m[C_{\text{тв}}(T_{\text{пл}} - T_{\text{нач}}) + Q_{\text{пл}} + C_{\text{ж}}(T_{\text{р}} - T_{\text{пл}})], \quad (3)$$

где m – масса металла, кг; $C_{\text{тв}}$ – теплоемкость твердого металла, кДж/(кг·°С); $T_{\text{пл}}$ – температура плавления металла, °С; $T_{\text{нач}}$ – начальная температура твердого металла, °С; $Q_{\text{пл}}$ – теплота плавления металла, кДж/кг; $C_{\text{ж}}$ – теплоемкость жидкого металла, кДж/(кг·°С); $T_{\text{р}}$ – температура разлива жидкого металла, °С.

Тепло, отводимое охлаждающей водой в кристаллизаторе, передается к его стенке через корку затвердевшего металла, через газовый зазор, слой шлака между заготовкой и стенкой кристаллизатора и, соответственно, определяется:

– значением коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{ж}}$ от потоков перегретого металла, который зависит, в основном, от скорости движения жидкой фазы в затвердевающей заготовке; примерные значения коэффициентов теплоотдачи от потоков различных сред приведены в табл. 1 [3], из которой видно, что их величина при вынужденной конвекции на порядок выше, чем при естественной;

Таблица 1. Примерные значения коэффициентов теплоотдачи от различных сред [3]

| Среда | $\alpha_{\text{ж}}$, ккал/(ч·м ² ·°С) | |
|-----------------|---|-----------------------|
| | естественная конвекция | вынужденная конвекция |
| Газы | 5 | 250 |
| Вязкие жидкости | 50 | 500 |
| Вода | 500 | 10000 |
| Жидкие металлы | 1500 | 50000 |

– значением коэффициента теплопроводности λ затвердевшей корочки, величина которого в зависимости от температуры и химического состава стали может изменяться в несколько раз [4];

– значением коэффициента теплопроводности газового зазора $\lambda_{\text{г}}$;

Кристаллизация и структурообразование сплавов

– значением коэффициента теплопроводности $\lambda_{ш}$ шлакового слоя между заготовкой и стенкой кристаллизатора.

Общий эффективный коэффициент теплоотдачи от жидкого металла к стенке кристаллизатора $\alpha_{кр}$ определяется [1]

$$\alpha_{кр} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ж}} + \Sigma_r}, \quad (4)$$

где $\alpha_{ж}$ – коэффициент теплоотдачи от жидкого металла; Σ_r – сумма промежуточных термических сопротивлений.

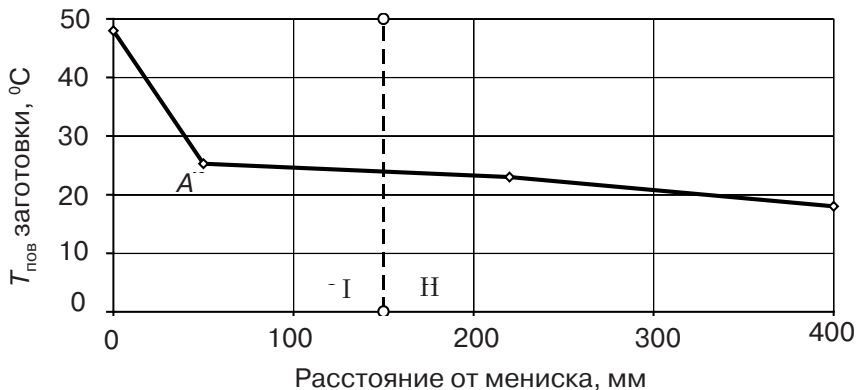
Так как точное определение всех вышеприведенных коэффициентов в реальных условиях практически невозможно, то, согласно уравнению теплового баланса, при расчетах можно принять, что количество тепла Q , передаваемое кристаллизатору, равно количеству тепла $Q_{в}$, отведенному охлаждающей водой, и определить следующим образом [5]:

$$Q = Q_{в} = m_{в} C_{в} (T_{к} - T_{н}), \quad (5)$$

где $m_{в}$ – масса воды, кг; $C_{в}$ – теплоемкость воды, кДж/(кг·°C); $T_{н}$ и $T_{к}$ – температура воды на входе и выходе из кристаллизатора.

Дальнейшее остывание заготовки по мере опускания ниже кристаллизатора происходит в зоне вторичного охлаждения. Отводимое от заготовки тепло в этой зоне состоит из потерь на нагрев охлаждаемой жидкости, потерь с поверхности заготовки путем конвективного нагрева окружающего воздуха и потерь теплоты, отбираемой роликами. Учитывать все эти потери на практике очень трудно, поэтому коэффициент теплоотдачи $\alpha_{вт}$ определяется только с учетом потерь тепла на нагрев и испарение охлаждающей воды [1].

В процессе непрерывной разливки металлов температура поверхности заготовок меняется за счет потерь тепла в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения от температуры солидуса данного металла до температуры резки. На рисунке в качестве примера приведена кривая динамики изменения температуры поверхности непрерывнолитой заготовки, полученная методом физического моделирования на камфене [6]. Приведенная кривая показывает, что основное снижение температуры поверхности заготовки происходит в кристаллизаторе, причем наиболее интенсивная теплоотдача – в верхней части кристаллизатора (до момента образования газового зазора между стенкой кристаллизатора и заготовкой) – от начала до точки перелома А.



Изменение температуры поверхности непрерывнолитой заготовки из камфена в зависимости от расстояния от мениска: I – зона кристаллизатора; II – зона вторичного охлаждения

Кристаллизация и структурообразование сплавов

В остальной части кристаллизатора теплопередача существенно снижается за счет образования газового зазора между заготовкой и стенкой кристаллизатора (рисунок, от точки А вправо).

Определение закономерностей теплообмена между заготовкой и кристаллизатором является очень важной задачей и их знание позволяет оптимизировать конструкцию кристаллизатора и режимы теплоотвода для каждого конкретного случая. На физической модели и натурном образце в данной работе были проведены эксперименты по изучению распределения тепловых потоков от затвердевающего модельного и алюминиевого слитков к стенке кристаллизатора, а также интенсивности теплоотвода в разных зонах [6, 7]. В табл. 2 представлено изменение плотности теплового потока по высоте кристаллизатора для обоих слитков.

Таблица 2. Изменение плотности теплового потока по высоте кристаллизатора

| Высота кристаллизатора, мм | Плотность теплового потока, Вт/м ² | |
|----------------------------|---|----------------------|
| | модельный слиток | натурный слиток |
| 5 | 4x10 ³ | – |
| 25 | 6x10 ³ | 19,6x10 ⁶ |
| 50 | 7x10 ³ | 58x10 ⁶ |
| 75 | 6,3x10 ³ | 95x10 ⁶ |
| 100 | 6x10 ³ | 72x10 ⁶ |
| 125 | 5,7x10 ³ | 33x10 ⁶ |
| 150 | – | 15x10 ⁶ |
| 180 | – | 7x10 ⁶ |

Заметно, что для обоих вариантов тепловые потоки имеют максимальную плотность на определенном расстоянии от свободной поверхности расплава.

Неравномерность плотности тепловых потоков по высоте связана с образованием зазора между корочкой слитка и стенкой кристаллизатора. Для модельного слитка точка максимум находится на расстоянии 50 мм от свободной поверхности расплава, а для натурального образца – на расстоянии 75 мм. Очевидно, что это различие обусловлено разной усадкой исследуемых материалов.

Уменьшение плотности тепловых потоков от затвердевающего расплава к стенке кристаллизатора (табл. 2), несомненно, вызывает уменьшение скорости кристаллизации по его высоте, а в дальнейшем – и в зоне вторичного охлаждения. С уменьшением скорости кристаллизации по ходу продвижения непрерывной заготовки уменьшаются количество выделяемой теплоты кристаллизации и, соответственно, тепловой поток. Изменение интенсивности тепловых потоков по высоте заготовки приводит к заметному ухудшению процесса теплоотвода от нее в разных зонах.

Известно, что основное количество тепла (>75 %) в пределах одной МНЛЗ отводится от непрерывнолитого слитка в зонах принудительного водяного охлаждения (кристаллизатор и зона вторичного охлаждения). Проведенный в данной работе расчет тепловых балансов формирования модельного непрерывнолитого слитка из камфена сечением 4950 мм² и реального алюминиевого слитка сечением 5025 мм² показал, что относительные значения теплоотвода в различных зонах модельного слитка хорошо коррелируются с аналогичными значениями для реального непрерывнолитого слитка (табл. 3).

Чтобы интенсифицировать теплообменные процессы при формировании непрерывнолитых заготовок можно достаточно эффективно использовать вибрацию (табл. 3). Из таблицы видно, что вибрация усиливает интенсивность теплоотвода от заготовки как в кристаллизаторе, так и в зоне вторичного охлаждения. Кроме этого

Таблица 3. Расчетные тепловые балансы непрерывнолитых слитков

| Расход тепла по зонам | Слиток из камфена | | | | Алюминиевый слиток | | | |
|--|-------------------|-----|-------------------|-----------------|--------------------|-----|---------------------|-----------------|
| | без вибрации | | с вибрацией | | без вибрации | | с вибрацией | |
| | кДж | % | кДж | % | кДж | % | кДж | % |
| Общее количество тепла расплава | 87,5 | 100 | 87,5 | 100 | 1660 | 100 | 1660 | 100 |
| Тепло, отведенное в кристаллизаторе | 23 | 26 | <u>25,5</u> 29 | <u>29</u> 33 | 486 | 29 | <u>538</u> 580 | <u>32</u> 35 |
| Тепло, отведенное в зоне вторичного охлаждения | 64,5 | 74 | <u>62</u> 58,5 | <u>71</u> 67 | 1174 | 71 | <u>1122</u> 1080 | <u>68</u> 65 |

Примечание: числитель – при вибрировании кристаллизатора; знаменатель – при вибрировании самой заготовки

необходимо отметить, что воздействие вибрации проявляется эффективнее при подводе импульса непосредственно к заготовке. Если при вибрировании кристаллизатора интенсивность отвода тепла по зонам повышается в среднем на 3-4 %, то при подводе виброимпульса к самой заготовке – до 7 %.

Усиление теплоотвода от поверхности заготовки в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения, о чем свидетельствует повышение температуры охлаждающей воды, связано с увеличением тепловых потоков, подводимых к границе затвердевания, за счет воздействия вибрации [6, 7]. Интенсификация теплоотвода от расплава приводит к росту темпа выделения теплоты кристаллизации и изменению геометрии двухфазной зоны затвердевающей заготовки, что, в конечном итоге, оказывает положительное воздействие на формирование кристаллической структуры и свойств литого металла.

Таким образом, на модельной и реальной непрерывнолитых заготовках показана возможность усиления теплообменных процессов при помощи вибрации в зонах принудительного охлаждения, а от интенсивности теплообменных процессов, в свою очередь, зависят производительность МНЛЗ и качество самой заготовки. Знание закономерностей теплоотвода в кристаллизаторе и ЗВО позволит оптимизировать конструкцию этих узлов машин непрерывной разливки.



Список литературы

1. Сковрцов А. А., Акименко А. Д. Теплопередача и затвердевание стали в установках непрерывной разливки. – М.: Metallurgia, 1966. – 190 с.
2. Таранов Е. Д. Исследование и усовершенствование процессов раскисления и легирования стали для фасонного литья: Дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1966. – 164 с.
3. Sztekeli J., Themelis N. Kate phenomena in Process Metallurgi. – New-York; Sydney; London; Toronto: Wiley Intencence a Division of Johu Wiley Sons. Inc, 1971. – 784 p.
4. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Технологии современной металлургии. – М.: Новые технологии, 2004. – 784 с.
5. Кузьмичев В. Е. Законы и формулы физики: Справочник. – Киев: Наук. думка, 1989. – 864 с.
6. Нурадинов А. С. Теплообменные процессы при формировании непрерывнолитых заготовок // Литейщик России. – 2006. – № 7. – С. 34-37.
7. Нурадинов А. С., Эльдарханов А. С., Таранов Е. Д. Теплообменные процессы при формировании НЛЗ в поле упругих колебаний // Сталь. – 2006. – № 6. – С. 51-52.

Поступила 21.06.2010