

## **МЕТОДИКА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЛУНКИ СЛИТКА В ПРОЦЕССЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ**

Хныкин А. В. – аспирант

*Красноярский государственный технический университет*

В статье предложена методика ультразвукового зондирования слитков на основе алюминия. Методика разработана в соответствии с зависимостью формы лунки от типа слитка.

Непрерывное литье слитков, обеспечивающее получение продукции высокого качества при низких затратах и высокой производительности, в настоящее время является основным способом разлива сплавов в производстве первичного и вторичного алюминия и сплавов на алюминиевой основе. Сущность метода заключается в непрерывной подаче жидкого металла в специальную водоохлаждаемую изложницу (кристаллизатор) с подвижным дном, роль которого выполняет подвижный поддон, перемещающийся в вертикальном направлении.

Поверхность кристаллизации, с одной стороны, и открытая поверхность слитка (мениск расплава), с другой стороны, ограничивают объем расплава, который называется лункой. Форма и глубина лунки оказывают влияние на качество слитка, увеличивая или уменьшая вероятность образования внутренних дефектов.

На геометрические параметры лунки (ее форма и глубина) оказывают влияние несколько факторов: форма слитка (цилиндрический, плоский), температура подаваемого расплава, скорость опускания поддона и интенсивность охлаждения слитка водой. Исследованиям лунки слитка посвящено много работ [3–5].

Для увеличения качества отливаемых слитков лучше всего регулировать скорость опускания поддона, поскольку изменение других факторов, влияющих на качество, невозможно без нарушения технологии

литья [6]. Но для эффективного регулирования скоростью опускания поддона необходимо «видеть» лунку, то есть наблюдать за ее изображением. Для получения изображения лунки лучше всего использовать ультразвуковое зондирование (рисунок 1).

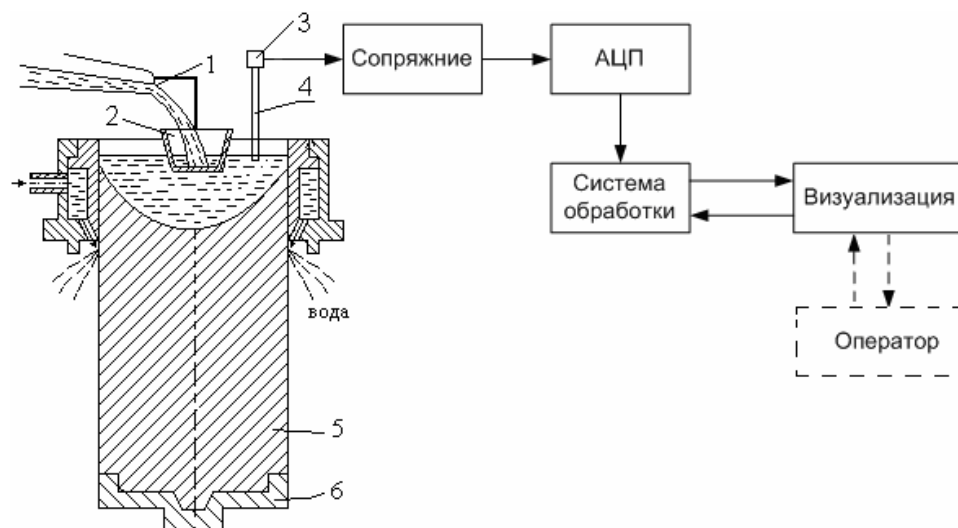


Рисунок 1 Схема ультразвукового сканирования лунки алюминиевого слитка:

1 – желоб; 2 – распределительный поплавок; 3 – ультразвуковой датчик;  
4 – волновод; 5 – слиток; 6 – поддон

Ультразвуковое сканирование невозможно проводить над всем мениском лунки, поскольку в его центре находится распределительная чаша, играющая роль регулятора при заливке расплава. В связи с этим лунку можно просканировать только от края мениска до распределительной чаши. Это приводит к возникновению погрешности при построении изображения лунки. Форма лунки при этом оказывает существенное влияние на величину погрешности.

Для плоского слитка глубина лунки может быть рассчитана [1]:

$$h = \frac{[q + \frac{1}{2} c\gamma(T_{кр} - T_H)] \cdot u_{л} x^2}{2\lambda \cdot (T_{кр} - T_H)},$$

где  $x$  – половина толщины слитка;

$c$  – теплоемкость твердой фазы;

$\gamma$  – плотность твердой фазы;

$q$  – удельная теплота кристаллизации;

$T_{кр}$  – температура кристаллизации;

$T_n$  – температура наружной поверхности слитка;

$u_l$  – скорость литья;

$\lambda$  – теплопроводность.

Для цилиндрического слитка глубина лунки может быть рассчитана:

$$h = \frac{[q + \frac{1}{2}c\gamma(T_{кр} - T_n)] \cdot u_l R^2}{4\lambda \cdot (T_{кр} - T_n)},$$

где  $R$  – радиус слитка.

Слишком большая лунка может привести к образованию в слитке внутренних трещин. Также для получения высококачественного слитка необходимо держать лунку не слишком глубокой, так как выход газов и неметаллических включений может быть затруднен. Практика непрерывного литья показывает, что наиболее равномерные по сечению слитка свойства сплавов, кристаллизующихся в широком температурном интервале, получаются в том случае, когда глубина лунки составляет около  $2/3$  диаметра слитка.

Форма лунки определяется в основном двумя факторами: формой сечения отливаемого слитка (прямоугольная, круглая) и наличием или отсутствием электромагнитного перемешивания. Размеры лунки в основном определяются температурой расплава, интенсивностью охлаждения и скоростью литья (скоростью опускания поддона).

Электромагнитное перемешивание (ЭМП) используют для выравнивания температуры внутри лунки, а также для сжатия расплавленного металла, что препятствует его вытеканию из

кристаллизатора. Для его использования вокруг кристаллизатора по периметру устанавливается электромагнитный индуктор. Так получается электромагнитный кристаллизатор (ЭМК).

В результате использования литья в ЭМК изменяется глубина лунки и ее форма. Изменения формы лунки в основном относятся к периферийной части слитка, где благодаря непрерывному теплоотводу поверхность лунки лишается резких перегибов, характерных для слитков, отлитых в кристаллизатор скольжения (КС). Таким образом, в сечении лунка принимает форму параболы (рисунок 2).

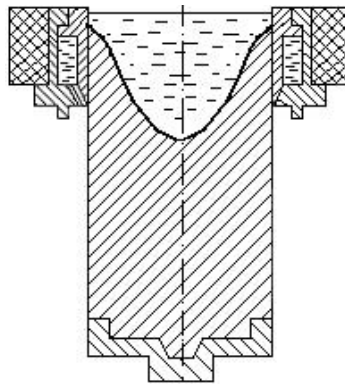


Рисунок 2 Лунка цилиндрического слитка, отлитого в ЭМК

В случае сканирования цилиндрического слитка, отливаемого в ЭМК, от края мениска до распределительной чаши достаточно получить четыре точки параболы, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга. Парабола будет достроена с использованием аппроксимации. Расчеты показывают, что погрешность при построении профиля лунки не превысит 8%. Metallургами установлена допустимая погрешность 10% [7]. Увеличение количества точек параболы, снимаемых при сканировании способно незначительно увеличить точность, которая повысится не более чем на 0,5%. Поэтому для построения двумерного изображения лунки достаточно получить четыре точки параболы (сечения лунки). Погрешность при определении глубины лунки будет больше на 0,5–1% и

будет составлять порядка 9%. Это связано с тем, что пологость вершины параболы различна в зависимости от внешних факторов и в результате аппроксимации она будет вычисляться с меньшей точностью. Схема сканирования лунки представлена на рисунке 3.

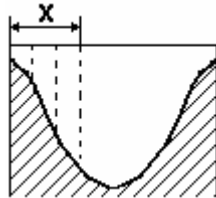


Рисунок 3 Сканирование профиля лунки

При отливке плоского слитка в ЭМК, в сечении лунка также принимает форму параболы (рисунок 4). Но, в отличие от цилиндрического слитка, парабола будет менее полой. Погрешность при определении формы лунки будет составлять так же около 8%. А погрешность определения глубины лунки снизится, в отличие от случая цилиндрического слитка. Она будет составлять порядка 8%, т. к. пологость вершины параболы не будет изменяться в большом диапазоне.

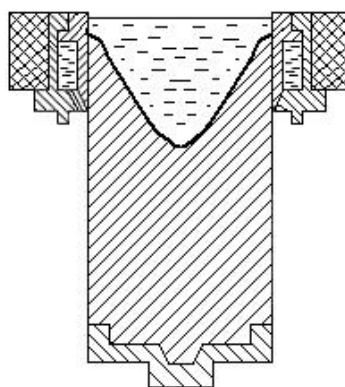


Рисунок 4 Лунка плоского слитка, отлитого в ЭМК

Профиль лунки цилиндрического слитка, отлитого в КС, представлен на рисунке 5. Здесь в сечении лунка принимает не форму

параболы, а форму ломаной, включающей в себя несколько перегибов. Наличие перегибов обусловлено тем, что затвердевание происходит при переменном значении коэффициента теплоотвода. Оно начинается в кристаллизаторе и продолжается при большей интенсивности теплоотвода по достижении зоны вторичного охлаждения. Из-за наличия дополнительных перегибов в сечении лунки при ее сканировании необходимо увеличить количество снимаемых точек вдвое, чтобы обеспечить погрешность, не превышающую 10%. В этом случае она будет колебаться от 8% до 9%. Такую же погрешность будет иметь вычисленная глубина лунки.

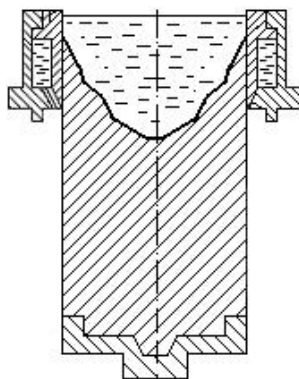


Рисунок 5 Лунка цилиндрического слитка, отлитого в КС

В поперечном сечении лунка плоского слитка при литье в КС содержит ряд перегибов. В отличие от цилиндрического слитка здесь перегибов меньше, что обуславливается более равномерным теплоотводом через стенки кристаллизатора (рисунок 6). Для получения приемлемой погрешности необходимо знать положения восьми точек профиля лунки. И глубина лунки, и ее форма будут получены с погрешностью 8–9%.

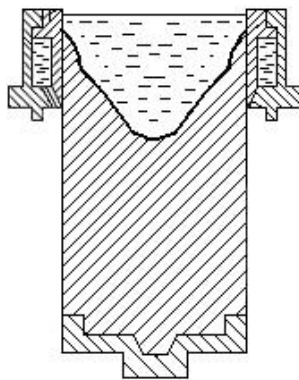


Рисунок 6 Лунка плоского слитка, отлитого в КС

Кроме прямоугольного и круглого сечений алюминиевые слитки отливают в кристаллизаторы квадратного сечения. При этом профиль лунки незначительно отличается от профиля лунки плоского слитка.

Изменение размеров лунки также оказывает влияние на ее профиль. При изменении температуры расплава глубина лунки возрастает. Следовательно, угол наклона боковой поверхности кристаллизации к оси слитка становится более острым.

Увеличение интенсивности охлаждения способствует уменьшению лунки. Таким образом, чем более интенсивным будет охлаждение слитка, тем угол наклона боковой поверхности кристаллизации к оси слитка будет менее острым.

Регулированием скорости опускания поддона добиваются изменения размеров лунки. При этом производители стараются увеличить скорость литья, не внося дополнительных рисков к образованию внутренних дефектов в слитке. Угол наклона боковой поверхности кристаллизации к оси слитка будет тем более острым, чем будет выше скорость литья (скорость опускания поддона).

Изменение угла наклона боковой поверхности слитка к оси слитка не влияет на количество перегибов лунки в сечении слитка. И для

цилиндрического, и для плоского слитка форма лунки не претерпит существенных изменений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вейник А. И. Расчет отливки. М.: Машиностроение, 1964. 404 с.
2. Вейник А. И. Теплообмен между слитком и изложницей. М.: Metallurgizdat, 1962. 264 с.
3. Добаткин В. И. Газы и окислы в алюминиевых деформируемых сплавах. М.: Metallurgiya, 1976. 240 с.
4. Добаткин В. И. Обработка легких и жаропрочных сплавов. М.: Metallurgiya, 1976. 352 с.
5. Добаткин В. И. Слитки алюминиевых сплавов. Свердловск: Metallurgizdat, 1960. 175 с.
6. Хныкин А. В. Ультразвуковое сканирование как метод повышения эффективности производства алюминия // Алюминий Сибири 2005. – Красноярск: НТЦ «Легкие металлы», 2005. С. 174–177.
7. Эскин Г. И. Металловедение и литье легких сплавов. – М.: Metallurgiya, 1977. 430 с.