

УДК 536.2:621.746.6

## АНАЛИЗ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО СЛИТКА ПО ТАБЛИЧНЫМ ДАННЫМ

**Е.А. Якубович**

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: ensave@samgtu.ru

*Показаны возможности анализа процесса затвердевания непрерывного слитка с использованием приближенных моделей регрессионного типа, полученных по табличным данным о режимах непрерывного литья алюминиевых сплавов. В качестве определяющих характеристик процесса использованы глубина жидкометаллической лунки, размер двухфазной зоны и температура поверхности слитка в зоне охлаждения. Показано, что технологически обоснованные значения глубины лунки и размера двухфазной зоны в центре слитка могут быть достигнуты для крупногабаритных слитков за счет сужения пояса интенсивного водяного охлаждения. Приведенные расчетные зависимости позволяют осуществить количественную оценку совместного влияния скорости литья и интенсивности охлаждения на прогнозируемые значения глубины лунки и размера двухфазной зоны.*

**Ключевые слова:** *приближенные модели, непрерывный слиток, затвердевание, алюминиевые сплавы.*

При разработке прогрессивной технологии непрерывного литья слитков из алюминиевых сплавов одной из актуальных задач является исследование и анализ взаимосвязи технологических параметров, определяющих процесс затвердевания [1].

Реальная сложность и многофакторность процесса формирования слитка на машинах непрерывного литья делает недостаточно эффективным в технологическом смысле применение для этих целей детерминированных математических моделей. Эффективный путь преодоления указанных трудностей состоит в разработке и применении методов получения приближенных моделей регрессионного типа с использованием представленных в табличном виде результатов численных и экспериментальных исследований, дающих исходный статистический материал для анализа процесса путем построения математических моделей [2, 3]. Появляющиеся здесь особенности связаны прежде всего со сложностью объекта и необходимостью получения удовлетворительной точности его описания при неизвестной заранее структуре модели. Табличные данные о режимах непрерывного литья, характеристиках процесса затвердевания и качества слитков могут быть в общем случае использованы для синтеза моделей по результатам численных исследований температурного поля слитка, устанавливающих зависимость определяющих характеристик процесса (глубина лунки, размер двухфазной зоны, температура поверхности в заданной точке слитка и др.) и иных важных функционалов температурного поля от внешних технологических и режимных параметров [4].

---

*Ефим Абрамович Якубович (к.т.н., доц.), профессор кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы».*

В работах [4, 5] выполнен синтез регрессионных моделей по результатам численного исследования затвердевания плоских слитков деформируемых сплавов типа Д16 и В95 толщиной 300–600 мм [6] для прогнозирования и анализа упомянутых характеристик процесса затвердевания в определенной области изменения внешних управляющих параметров (размер слитка, скорость литья, интенсивность охлаждения) с учетом некоторых конструктивных и технологических особенностей реальной установки для непрерывного литья.

Полученные зависимости могут быть представлены в виде

$$h_l = 1,430 \cdot 10^{-4} v b^2 + \frac{143,9 z^*}{b} - \frac{5,794 z^* \sqrt{\alpha^*}}{b^{3/2}}, \quad (1)$$

$$h_s = 1,875 \cdot 10^{-4} v b^2 + \frac{14,32 z^*}{b} + 8,649 \frac{\sqrt{v z^*}}{630 - t^*} + \frac{232,4 z^*}{630 - t^*} + \frac{2,188 \cdot 10 z^*}{b \alpha^*}, \quad (2)$$

$$\delta = 8,651 \cdot 10^{-5} v b^2 + \frac{1,298 \cdot 10^{20} (z^*)^2}{v^3 b^7 (630 - t^*)} + \frac{2,244 \cdot 10^{-11} v^4 b^6}{z^* \alpha^* (630 - t^*)} + \frac{1559 v (z^*)^2}{\alpha^* (630 - t^*)^2} + \frac{8,464 \cdot 10^9 z^*}{b^2 \alpha^* (630 - t^*)} - \frac{8,864 \cdot 10^{-6} v b (z^*)^2}{630 - t^*}, \quad (3)$$

$$t_n(z^*) = 27,52 + \frac{3,900 \cdot 10^7 \sqrt{v}}{z^* \alpha^*} - \frac{1,608 \cdot 10^7 v b^2}{(z^* \alpha^*)^2} - \frac{1,431 \cdot 10^{-5} z^* \alpha^*}{\sqrt{v}}. \quad (4)$$

Входящие в формулы величины означают:  $h_l$ ,  $h_s$  – глубина лунки, соответствующая изотермам ликвидус и солидус;  $\delta$  – максимальный вертикальный размер двухфазной зоны;  $t_n(z^*)$  – температура поверхности в сечении  $z^*$ , соответствующем максимальному значению коэффициента теплоотдачи на поверхности слитка  $\alpha^*$ ;  $b$  – полутолщина слитка;  $v$  – скорость литья и имеют следующие размерности:  $h_l$ ,  $h_s$ ,  $\delta$ ,  $z^*$  – мм;  $t_n(z^*)$  – °С;  $v$  – мм/мин;  $\alpha^*$  – Вт/(м<sup>2</sup>К).

Ниже приведены некоторые результаты применения моделей (1) – (4) для анализа затвердевания основных в производстве плоских слитков толщиной 300–400–600 мм, широко используемых для получения листовых полуфабрикатов различного назначения. В качестве исходных технологических требований учитываются ограничения на скорость литья слитков указанных типоразмеров соответственно 60–90; 40–60; 25–40 мм/мин, а также определяемые особенностями конструкции кристаллизатора значения  $z^* = (160–300)$  мм,  $t_n(z^*) = (50–200)$  °С,  $\alpha^* = (1500–25000)$  Вт/(м<sup>2</sup>К).

Для рассматриваемой ситуации существенными являются два ориентира, достижение которых является технологически обоснованным по результатам промышленной реализации непрерывного литья крупногабаритных слитков:

- обеспечение минимальных значений  $h_c$  и  $\delta$  для формирования достаточно плотной, беспористой структуры центральной зоны слитка;
- обеспечение относительно высокой температуры поверхности для снижения разности скоростей охлаждения центральных и поверхностных зон с целью снижения вероятности трещинообразования.

Для заданных на уровне технологических значений  $v$  и  $\alpha^*$  на рис. 1 приведены зависимости  $h_s$ ,  $\delta$  и  $t_n(z^*)$  от  $z^*$  (толщина слитка 400 мм).

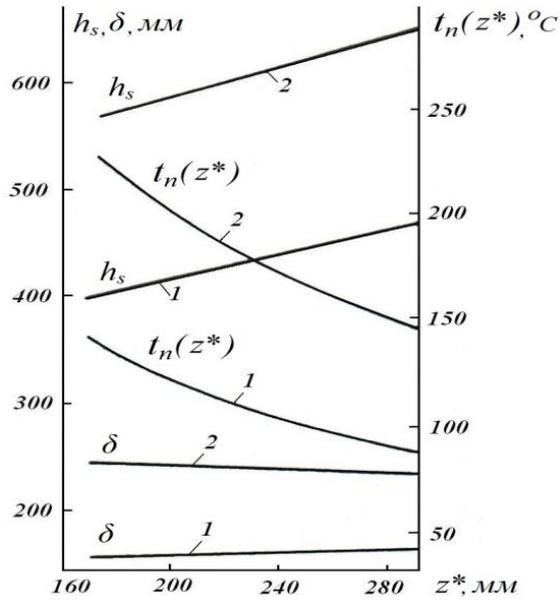


Рис. 1. Зависимости характеристик процесса затвердевания  $h_s$ ,  $\delta$  и температуры поверхности  $t_n(z^*)$  от параметра  $z^*$

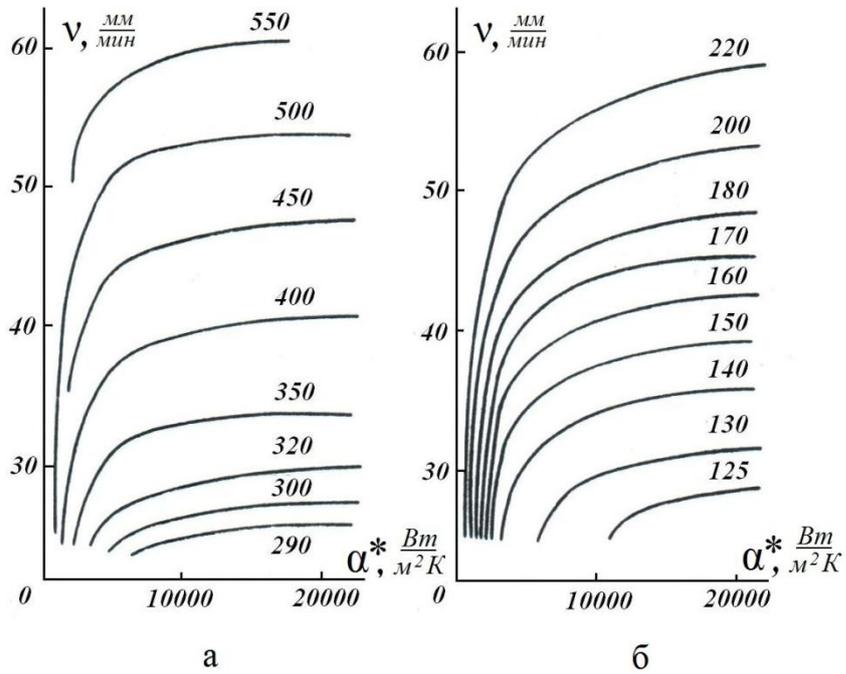


Рис. 2. Изолинии  $h_s$  (а) и  $\delta$  (б) в плоскости  $(v, \alpha^*)$  при значениях параметров  $z^* = 170 \text{ мм}$ ,  $t^* = 50^\circ \text{С}$ . Цифры у кривых означают соответственно  $h_s$  и  $\delta$ , мм:

$$1 - v = 40 \frac{\text{мм}}{\text{мин}}, \alpha^* = 12000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}; 2 - v = 60 \frac{\text{мм}}{\text{мин}}, \alpha^* = 8000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$$

Из анализа кривых следует, что уменьшением  $z^*$ , т. е. приближением точки максимального значения  $\alpha^*$  к нижнему срезу кристаллизатора, можно обеспечить одновременный учет обоих требований. Это соответствует реальной тенденции в проектировании конструкций систем охлаждения крупногабаритных слитков, выражающейся в сужении пояса интенсивного охлаждения.

Дальнейшие расчеты, результаты которых для слитка толщиной 400 мм приведены на рис. 2, выполнены для  $z^* = 170$  мм, что близко к действительному значению этого параметра в реальных системах охлаждения.

Здесь представлены изолинии глубины лунки по солидусу  $h_s$  и максимального размера двухфазной зоны  $\delta$  в плоскости  $(v, \alpha^*)$ . Они предназначены для количественной оценки совместного влияния скорости литья  $v$  и интенсивности охлаждения слитка  $\alpha^*$  на прогнозируемые значения глубины лунки  $h_s$  и размера двухфазной зоны  $\delta$ . Это позволяет выбрать наиболее целесообразные пределы назначения скорости литья  $v$  для конкретных конструкций систем охлаждения, характеризующихся собственными значениями  $\alpha^*$ .

Анализируя вид представленных кривых, можно заключить, что режимы литья, обеспечивающие минимальные значения  $h_s$  и  $\delta$ , должны соответствовать пониженным скоростям литья  $v$  и относительно большим значениям  $\alpha^* = (12000-16000) \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ . Однако такие режимы технологически не являются рациональными, т. к. снижают производительность процесса и труднодостижимы в существующих системах струйного охлаждения слитков. Кроме того, при этом невозможно приблизиться к выполнению требования о необходимости обеспечить относительно высокую температуру поверхности слитка, т. к. для заданного режима охлаждения (т.е.  $\alpha^* = \text{const}$ ) уменьшение  $v$  стимулирует ее снижение.

Полученная по результатам расчетов информация используется для обоснования технических требований к системам охлаждения и регулирования скорости литья, которыми оснащаются установки для непрерывного литья плоских слитков алюминиевых сплавов, а также для синтеза основных алгоритмов контроля и управления процессом.

Дальнейшие перспективы развиваемого подхода определяются прежде всего ориентацией на анализ тенденций изменения режимных параметров в их взаимосвязи при одновременном определении вида и содержания экспериментальных исследований, которые необходимо осуществить в производственных условиях для оценки согласованных с реальными возможностями машины непрерывного литья рациональных значений  $v$  и  $\alpha^*$ .

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черепок Г.В., Якубович Е.А. Совершенствование технологии непрерывного литья слитков деформируемых алюминиевых сплавов // Высокие технологии в машиностроении: Мат-лы Всеросс. науч.-техн. интернет-конф. 21–25 окт. 2014 г., Самара, СамГТУ. – С. 111-112.
2. Клявинь Я.Я., Клявиня И.Я., Позняк А.А. Методика синтеза регрессионных моделей на основе данных о влиянии параметров литья на критерии качества // Изв. АН ЛатвССР. Сер. Физ. и техн. науки. – 1982. – № 1. – С. 65-71.
3. Клявинь Я.Я., Клявиня И.Я. Метод прямого моделирования объекта по табличным данным // Препринт Ин-та физики АН ЛатвССР. – Рига, 1983. – 38 с.

4. *Клявинь Я.Я., Клявиня И.Я., Брока М.Э., Якубович Е.А.* Синтез регрессионных моделей по результатам численного исследования температурного поля слитка // Изв. АН ЛатвССР. Сер. Физ. и техн. науки. – 1982. – № 6. – С. 76-84.
5. *Якубович Е.А.* Приближенные модели регрессионного типа для анализа затвердевания непрерывных слитков алюминиевых сплавов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 4(40). – С. 222-224.
6. *Брока М.Э., Клявинь Я.Я., Шадрин Г.Г., Якубович Е.А.* Численное исследование затвердевания плоских слитков из высоколегированных алюминиевых сплавов при непрерывном литье // Цветные металлы. – 1986. – № 4. – С. 75-77.

*Статья поступила в редакцию 5 октября 2014 г.*

## **ANALYSIS OF THE CONTINUOUS CASTING INGOT SOLIDIFICATION USING TABULAR DATA**

***E.A. Yakubovich***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

*The paper deals with the technique of approximate mathematical models production based on the data of temperature field in solidifying ingot. The dependence of the effect of casting velocity and cooling regime parameters upon the most important ingot solidification characteristics were obtained in the case of Al alloys continuous casting. The temperature field in ingots was determined as a result of numerical study but the models were obtained in the terms of the elementary function sums with coefficients. The results of application of the models have been presented.*

***Keywords:*** *approximate models, continuous ingot, solidification, aluminium alloys.*