

УДК 518.3:621.746.6

НОМОГРАММЫ ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЖИМОВ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ СЛИТКОВ В ПРОЦЕССЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ

Е.А. Якубович

Самарский государственный технический университет
Россия, 443110, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: ensave@samgtu.ru

Представлены номограммы, отражающие взаимосвязь основных параметров технологического режима формирования слитков алюминиевых сплавов при литье в электромагнитный кристаллизатор. Расчетный анализ выполнен на основе ранее синтезированных приближенных моделей регрессионного типа по результатам численного исследования температурного поля слитка. Показано, что за счет технологически допустимого снижения максимальной интенсивности охлаждения при соответствующей корректировке скорости литья можно уменьшить размер двухфазной области в центральной зоне слитка. Применение указанного подхода целесообразно на этапе освоения производства слитков с регламентированными требованиями по качеству.

Ключевые слова: номограмма, приближенные модели, непрерывный слиток, режимы затвердевания, алюминиевые сплавы.

Необходимым элементом в решении сложного комплекса задач по совершенствованию технологии непрерывного литья слитков алюминиевых сплавов, используемых для производства пресованных и листовых полуфабрикатов различного назначения, является прогнозирование пределов режимных технологических параметров, позволяющих получать слитки нормированного качества с высоким выходом годного [1].

Выполненные в работах [2, 3] исследования по использованию прямого моделирования процесса формирования непрерывного слитка по табличным данным с выходом на построение приближенных моделей регрессионного типа для анализа затвердевания слитков алюминиевых сплавов свидетельствуют о том, что подобный подход является достаточно обоснованным. Он дает возможность на содержательном инженерном уровне интерпретировать технологическую ситуацию и на стадии проработки эффективности предлагаемых к реализации режимов учитывать взаимосвязи определяющих технологических параметров и их влияние на показатели качества слитка. Представленные в [4, 5] результаты исследований посвящены реализации указанного подхода для получения приближенных моделей для описания затвердевания плоских слитков деформируемых алюминиевых сплавов толщиной 300–400–600 мм при непрерывном литье в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК).

В настоящей работе с использованием моделей [4, 5] выполнен расчетный анализ тенденций изменения основных режимных параметров в их взаимосвязи, что необходимо учитывать в производственных условиях для оценки рациональ-

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

ных значений скорости литья v и интенсивности охлаждения α^* с представлением результатов в виде номограмм.

Номографические методы занимают значительное место в практике инженерно-технических расчетов [6]. Являясь удобным счетным инструментом для вычислений по готовым формулам, номограммы позволяют значительно сократить время расчетов и быстро решить нужную задачу с достаточной для практики точностью. Преимущество номограмм состоит в том, что они позволяют быстро решать в численном виде номографированное уравнение относительно любой входящей в него переменной и широко варьировать исходные данные для получения требуемого ответа. Для анализа многофакторных технологических процессов оказываются удобными и эффективными номограммы, дающие возможность графического изображения сложных зависимостей и позволяющие осуществить объективную оценку поведения выбранного параметра в зависимости от сочетания остальных.

Для анализа режима охлаждения слитка весьма важной и информативной характеристикой является $t_n(h_s)$ – температура поверхности в поперечном сечении, соответствующем глубине лунки по солидусу h_s , для расчетного определения которой использованы зависимости, полученные в [4, 5], отражающие реальные особенности типовой конструкции ЭМК. Номограммы, представленные на рисунке, построены следующим образом: при различных v и принятых значениях h_s или δ каждой точке на кривых соответствует необходимое значение α^* , обеспечивающее данное h_s или δ , и прогнозируемая при данном режиме литья температура поверхности слитка на уровне глубины лунки $t_n(h_s)$.

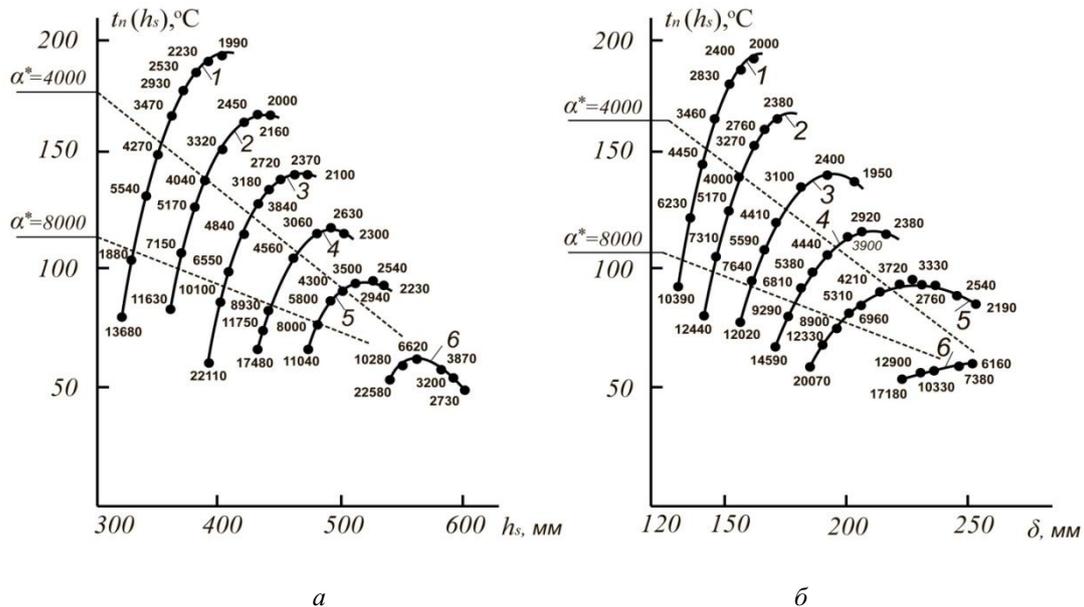
Таким образом, приведенные номограммы связывают сразу четыре характеристики технологического режима непрерывного литья из пяти, используемых для его анализа. При фиксированных значениях скорости литья v , обычно достаточно жестко определяемых типоразмером слитка, эти кривые позволяют обоснованно выбрать значения α^* , и наоборот.

Эффективность представленных на рисунке зависимостей состоит в том, что они показывают тенденции изменения параметров технологического режима непрерывного литья в их взаимосвязи. Соответственно они помогают решить вопрос о том, какие эксперименты необходимо поставить в производственных условиях для определения согласованных с реальными возможностями машины непрерывного литья рациональных значений v и α^* . Предположим, что в первом приближении нормированный режим существующей технологии характеризуется значениями $v = 40$ мм/мин и $\alpha^* = 8000$ Вт/м² К. В этом случае характеристики режима затвердевания будут иметь следующие значения: $h_s = 405$ мм, $\delta = 158$ мм, $t_n(z^*) = 192^\circ\text{C}$, $t_n(h_s) = 94^\circ\text{C}$.

Как видно из рисунка, приведенные расчетные зависимости с увеличением скорости литья приобретают экстремальный характер. Основные выводы, которые можно при этом сделать, сводятся к следующему:

- при $v = 40$ мм/мин можно допустить некоторое снижение интенсивности охлаждения до $\alpha^* = 6000 - 7000$ Вт/м² К без существенного (менее 3 %) увеличения глубины лунки слитка h_s и максимального размера двухфазной зоны δ . При этом отмечается возрастание температуры поверхности $t_n(z^*)$ и $t_n(h_s)$ соответственно на 26 и 14 %, что должно по-

ложительно сказываться на вероятности трещинообразования вследствие уменьшения температурных градиентов по толщине слитка;



Значения температуры поверхности слитка на уровне глубины лунки $t_n(h_s)$ в зависимости от h_s (а) и δ (б) для слитка толщиной 400 мм. Цифры у точек соответствуют значениям α^* в Вт/м²К. 1, 2, 3, 4, 5, 6 – скорость литья v соответственно 30, 35, 40, 45, 50 и 60 мм/мин

- при снижении скорости литья v можно соответствующим подбором интенсивности охлаждения α^* одновременно улучшить все четыре характеристики процесса затвердевания: уменьшить h_s и δ и увеличить $t_n(z^*)$ и $t_n(h_s)$. Например, при $v = 35$ мм/мин, т. е. за счет допустимого снижения производительности процесса на 12,5 %, для $\alpha^* = 7400$ Вт/м² К по сравнению со стандартным режимом показатели h_s и δ уменьшаются на 9 %, а величины $t_n(z^*)$ и $t_n(h_s)$ увеличиваются соответственно на 2,5 и 15 %.

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. Самара, СамГТУ, 2014. – С. 111–112.
2. Клявинь Я.Я., Клявиня И.Я. Метод прямого моделирования объекта по табличным данным // Препринт Ин-та физики АН Латв. ССР, Рига, 1983. – 38 с.
3. 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.
4. 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.

5. Якубович Е.А. Анализ затвердевания непрерывного слитка по табличным данным // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2014. – № 4(44). – С. 209–213.
6. Хованский Г.С. Номография и ее возможности. – М.: Наука, 1977. – 128 с.

Статья поступила в редакцию 25 января 2014 г.

NOMOGRAMS FOR THE ANALYSIS OF THE INGOTS SOLIDIFICATION MODES IN CONTINUOUS CASTING PROCESS

E.A. Yakubovich

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The paper deals with the nomograms reflecting the relationship of basic parameters of the technological mode of formation of aluminum alloy ingots for continuous casting in an electromagnetic mold. Design analysis is made on the basis of previously synthesized approximate models such as regression on the results of a numerical study of the temperature field of the ingot. It is shown that by lowering the maximum technologically permissible cooling intensity at the corresponding adjustment of the casting speed can reduce the size of the two-phase region in the central zone of the ingot. The application of this approach, it is advisable to the stage of development of ingots production with regulated quality requirements.

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