

УДК 519.95:621.746.6

СТАБИЛИЗАЦИЯ РЕЖИМА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ПЛОСКИХ СЛИТКОВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ПРИБЛИЖЕННЫХ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Е.А. Якубович

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

E-mail: ensave@samgtu.ru

На основе результатов численного исследования температурного поля непрерывного слитка толщиной 400 мм получены приближенные регрессионные модели для оценки глубины жидкометаллической лунки и размеров двухфазной области в центре слитка в зависимости от характеристик системы охлаждения и скорости литья. Показаны возможности приближенных моделей регрессионного типа для обоснования режимных параметров системы охлаждения плоских слитков алюминиевых сплавов при непрерывном литье в электромагнитный кристаллизатор с целью стабилизации температурных условий формирования и свойств слитка. Выполнена интервальная оценка значений и определены допустимые пределы колебаний интенсивности охлаждения, уровня жидкого металла в кристаллизаторе, температуры жидкого металла, скорости вытягивания слитка, обеспечивающие поддержание глубины жидкометаллической лунки и размеров двухфазной зоны в центре слитка в пределах 5 % отклонения от технологически обоснованных значений.

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

В работах [1, 2] указаны основные области применения приближенных регрессионных моделей, соответствующих процессу формирования непрерывного плоского слитка при литье в электромагнитный кристаллизатор. Их использование позволяет анализировать эффективность действующей промышленной технологии и содействует обоснованию параметров технологических режимов для литья крупногабаритных слитков. Не менее важной является задача количественной оценки влияния различных факторов на косвенные критерии качества слитка с целью разработки системы управления процессом непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор, предназначенной для стабилизации заданного режима формирования слитка.

Для замкнутой системы управления процессом целесообразно использовать итерационно-табличный способ, который предусматривает осуществление принципа управления по отклонению выходных переменных от заданного значения [3]. Коррекция технологического режима осуществляется циклически в дискретные моменты времени по итерационной схеме

$$U_i = U_{i+1} + \Delta U_i, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots$ – номер итерационного цикла; ΔU_i – вектор изменения управляющих воздействий, приводящий к стабилизации (в смысле удовлетворения заданной точности) технологического режима. Итерационный алгоритм реализуется

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

при управлении объектом с использованием стандартной обратной табличной модели, которая строится в виде таблицы взаимно однозначных соответствий вида

$$U \leftrightarrow Y, \quad (2)$$

где U и Y – векторы управляющих воздействий и выходных переменных (в рассматриваемом случае косвенных критериев качества). Итерационный алгоритм вступает в действие, если норма $\|Y_0 - Y_{i-1}\|$ превысит заданную величину. При этом циклически осуществляется поиск требуемой величины ΔU_i . Таким образом, реализация итерационного алгоритма управления сводится к поисковым процедурам и простейшим вычислительным операциям. Интервальная оценка значений управляющих параметров, позволяющих стабилизировать уровень контролируемых выходных переменных с заданной точностью, необходима для правильного составления таблиц $U \leftrightarrow Y$, являющихся важной частью информационного обеспечения системы управления технологическим процессом формирования непрерывного слитка.

Полученные в [1, 2] регрессионные модели синтезированы по результатам численного исследования температурного поля непрерывного слитка толщиной $d = 400$ мм из сплава АМг6 [4]. С учетом некоторых конструктивных и технологических особенностей реальной установки для непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор эти зависимости могут быть представлены в виде

$$h_n = 325,9v + 0,2240z_1 - 0,2097 \cdot 10^{-3} v \tilde{\alpha}_3 - 0,1226 \cdot 10^3 v^2/z_1 - 0,01019av^2/z_1, \quad (3)$$

$$\delta = 97,6v + 0,5133 \cdot 10^{-2} v \tilde{\alpha}_2 - 0,5136 \cdot 10^{-8} a^2 v - 0,3774 \cdot 10^{-2} v \alpha_2 - 0,02370 v \sqrt{a} - 0,03073 v \sqrt{\alpha_3} + 0,1161 \cdot 10^{-7} v \alpha_2^2, \quad (4)$$

$$h_c = 399,5v + 0,3264z_1 - 0,3447 \cdot 10^{-3} v \tilde{\alpha}_3 - 0,01486av^2/z_1, \quad (5)$$

причем $\tilde{\alpha}_2 = \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)}{2}$;

$$\tilde{\alpha}_3 = \frac{(\alpha_2 + \alpha_3)}{2} ;$$

$$z_1 = 0,04 - h_{yp} - \Delta z ;$$

$$\Delta z = \frac{0,5 c p v (t_{зал} - 700) d}{\alpha_{cp} (t_{пов}^{cp} - t_{охл})} ;$$

$$\alpha_{cp} = \frac{\alpha_1}{2} .$$

Здесь h_n , h_c и δ обозначают соответственно глубину жидкометаллической лунки по температурам ликвидуса и солидуса и высоту двухфазной зоны в центральном сечении слитка; h_{yp} – уровень жидкого металла в кристаллизаторе; c и p – удельную теплоемкость и плотность; v – скорость вытягивания слитка; $t_{пов}^{cp}$ – среднюю температуру поверхности слитка на участке от мениска до поперечного сечения с температурой поверхности 700 °С. Остальные обозначения соответствуют принятым в [4].

С использованием моделей (3)–(5) был осуществлен поиск пределов колебания управляющих параметров $\{v, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, a, h_{yp}, t_{зал}\}$ таким образом, чтобы

значения h_c и δ , выбранных в качестве косвенных критериев качества слитка, поддерживались с точностью 5 %. За оптимальный режим, который нужно стабилизировать с указанной точностью, выбран режим, определенный по результатам исследования оптимальных условий затвердевания слитка [5], характеризующийся следующими значениями параметров: $v^0 = 10^{-3}$ м/с, $\alpha_1^0 = 6,28 \cdot 10^3$ Вт/м²К, $\alpha_2^0 = 58 \cdot 10^3$ Вт/м²К, $\alpha_3^0 = 40 \cdot 10^3$ Вт/м²К, $a^0 = 17 \cdot 10^3$ Вт/м²К, $h_{ур}^0 = 0,02$ м, $t_{зал}^0 = 700$ °С. Для данного режима косвенные показатели качества слитка имеют следующие числовые значения: $h_c^0 = 0,378$ м и $\delta^0 = 72 \cdot 10^{-3}$ м.

Выполненный на основе выражений (3) – (5) анализ с учетом технологических ограничений на управляющие параметры показал, что с уменьшением α_1 , α_2 , α_3 , a , $h_{ур}$, $t_{зал}$ выходные переменные h_c и δ закономерно увеличиваются, а уменьшение скорости вытягивания v действует в противоположном направлении. Как следует из результатов расчетов, стабилизация косвенных критериев качества слитка h_c и δ на уровне 5 % отклонения от заданных значений h_c^0 и δ^0 требует поддержания управляющих параметров на уровне 3 % от принятых в качестве технологически обоснованных. Отмеченное обуславливает высокие требования к потенциальной точности локальных регуляторов, предназначенных для управления расходом и уровнем жидкого металла, температурой и количеством охлаждающей воды, скоростью вытягивания слитка. Отсутствие стабилизации режимных параметров формирования непрерывного слитка в электромагнитном кристаллизаторе может привести к неконтролируемым изменениям глубины жидкометаллической лунки и размеров двухфазной области, что на практике является причиной недопустимой нестабильности структурных показателей и свойств слитка.

Полученная по результатам расчетов информация используется для обоснования технических требований к локальным регуляторам, которыми оснащаются установки для непрерывного литья слитков алюминиевых сплавов в электромагнитный кристаллизатор, а также для синтеза основных алгоритмов контроля и управления процессом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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. Скурихин В.И., Житецкий Л.С., Проценко Н.М. Итеративно-табличные автоматы. – Киев: Наукова думка, 1977. – 168 с.
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.
7. Брока М.Э., Клявинь Я.Я., Якубович Е.А. Численное исследование оптимальных режимов затвердевания слитков алюминиевых сплавов при непрерывном литье в электромагнитный кристаллизатор // Изв. АН ЛатвССР. Сер. Физ. и техн. науки. – 1981. – № 4. – С. 61-67.

Статья поступила в редакцию 5 января 2014 г.

STABILIZATION MODE OF THE CONTINUOUS CASTING REGIME FOR ALUMINUM ALLOYS FLAT BARS BASED ON APPROXIMATE REGRESSION MODELS

E.A. Yakubovich

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

The approximate regression models to estimate the depth of the liquid metal hole and the size of the two-phase zone in the center of the ingot, depending on the characteristics of the cooling system and the casting speed based on the results of numerical studies of the temperature field of a continuous 400mm thickness ingot, are presented. The paper deals with the possibilities of the approximate regression type models to justify the parameters of continuous casting of aluminum alloys in electromagnetic mold with a view to stabilize the temperature conditions of formation and properties of the ingot. The limits of the cooling intensity oscillations, the level and temperature of the liquid metal and the rate of the ingot pulling speed ensure maintaining the depth of the liquid metal hole and the size of the two-phase zone in the center of the ingot within 5% deviation from reasonable values was defined.

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