

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2023-34-41-45>

## ВЗАИМОСВЯЗЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ СЛИТКОВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КРИСТАЛЛИЗАТОР

*Якубович Е.А.*

*Самарский государственный технический университет, Самара, Россия*

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, непрерывное литье, плоский слиток, электромагнитный кристаллизатор, табличные данные, скорость литья, интенсивность охлаждения.

**Аннотация.** На основе методологии синтеза приближенных моделей регрессионного типа, полученных по табличным данным о режимах непрерывного литья алюминиевых сплавов в электромагнитный кристаллизатор, показаны возможности анализа процесса затвердевания слитка. В качестве определяющих характеристик процесса использованы глубина жидкометаллической лунки, размер двухфазной зоны и температура поверхности слитка в зоне охлаждения. Приведенные расчетные зависимости позволяют осуществить количественную оценку совместного влияния скорости литья и интенсивности охлаждения на прогнозируемые значения глубины лунки и размера двухфазной зоны.

## INTERRELATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF CONTINUOUS CASTING OF ALUMINUM ALLOY INGOTS IN ELECTROMAGNETIC MOLD

*Yakubovich E.A.*

*Samara state technical university, Samara, Russia*

**Keywords:** aluminum alloys, continuous casting, flat ingot, electromagnetic mold, tabular data, casting speed, cooling rate.

**Abstract.** Based on the methodology for the synthesis of approximate models of the regression type, obtained from tabular data on the modes of continuous casting of aluminum alloys in an electromagnetic mold, the possibilities of analyzing the process of ingot solidification are shown. The depth of the liquid metal hole, the size of the two-phase zone, and the surface temperature of the ingot in the cooling zone were used as the defining characteristics of the process. The given calculated dependences make it possible to quantify the combined effect of the casting speed and cooling intensity on the predicted values of the dimple depth and the size of the two-phase zone.

Развитие металлургии и машиностроения неразрывно связано с возрастающим применением технологий, направленных на обеспечение комплекса эксплуатационных свойств сплавов, отвечающих требованиям интенсификации производства, создания новых технологических процессов и оборудования. Сказанное в полной мере относится к процессам производства слитков алюминиевых сплавов, служащих исходными заготовками для получения разнообразных видов полуфабрикатов методами обработки давлением.

Одним из наиболее современных и эффективных методов производства слитков алюминиевых сплавов для последующего использования в процессах получения катаных и пресованных полуфабрикатов является непрерывное

литье с формированием контура слитка электромагнитным полем [1], что обусловлено рядом существенных преимуществ этого вида заготовительного литья. В условиях эффективного электромагнитного перемешивания расплава и интенсификации охлаждения поверхности слитка по сравнению с литьем в контактный кристаллизатор скольжения в процессе кристаллизации происходят структурные изменения, обуславливающие достижение высокого уровня механических и технологических свойств слитков. Результаты масштабных исследований и практические результаты по разработке основ расчетов и проектирования технологических режимов непрерывного литья слитков различных типоразмеров в электромагнитном поле приведены в [2-4]. Вместе с тем самостоятельный интерес представляет уточненный анализ взаимозависимостей основных технологических параметров процесса непрерывного литья с учетом особенностей охлаждения слитка в процессе формирования в электромагнитном поле.

Процесс кристаллизации слитка на машинах непрерывного литья является многофакторным, причем количественные значения основных технологических параметры назначаются в реальных производственных ситуациях на основе эмпирических сведений приближенно. Соответственно одной из главных задач управления формированием слитка является установление закономерностей связи между показателями процесса затвердевания и внешними технологическими и режимными параметрами для достижения повышенных выходов годного.

Экспериментальные программы и методы математического моделирования для исследования взаимосвязи между параметрами литья и основными характеристиками процесса, определяющими качество затвердевшего металла, лежат в основе разработки и совершенствования технологического процесса непрерывного литья алюминиевых сплавов. Результаты подобных исследований обычно представляют и систематизируют в виде таблиц, дающих исходный статистический материал для анализа процесса путем построения математических моделей.

В главных аспектах указанная проблема наиболее эффективно может быть решена с применением методов получения приближенных моделей регрессионного типа на базе структурной и параметрической идентификации [5]. Их преимуществами являются отказ от априорного задания структуры модели и возможность получения моделей с достаточной прогнозирующей силой даже при небольшом количестве точек в пространстве независимых переменных.

Представленные в [6, 7] результаты исследований по использованию прямого моделирования процесса формирования непрерывного слитка по табличным данным с выходом на построение приближенных модели регрессионного типа для анализа затвердевания слитков алюминиевых сплавов 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).

Весьма важной и информативной характеристикой режима охлаждения слитка является  $t_n(h_s)$  – температура поверхности в поперечном сечении, соответствующем глубине лунки по солидусу  $h_s$ , для расчетного определения которой использованы зависимости, отражающие реальные особенности типовой конструкции ЭМК.

Соответствующий расчетный анализ тенденций изменения основных режимных параметров на установившемся этапе литья для слитка толщиной 400 мм в их взаимосвязи представлен на рисунке 1.

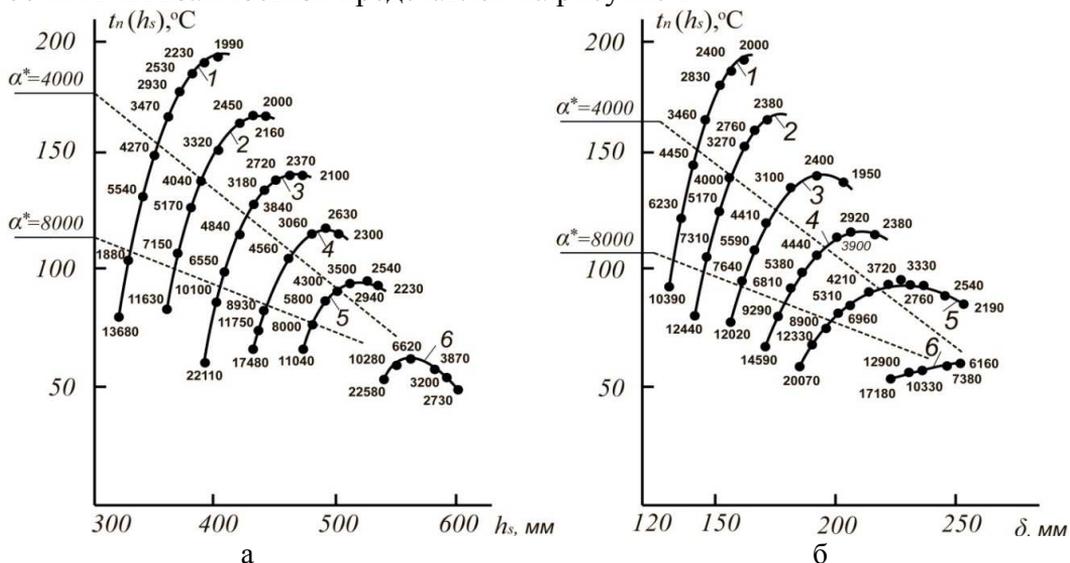


Рис. 1. Зависимость температуры поверхности слитка на уровне глубины лунки  $t_n(h_s)$  от глубины лунки по солидусу  $h_s$  (а) и размера двухфазной зоны  $\delta$  (б) для слитка толщиной 400 мм. Цифры у точек соответствуют значениям интенсивности охлаждения боковых граней слитка  $\alpha^*$  в Вт/м<sup>2</sup>К, 1,2,3,4,5,6 – скорость литья  $v$  соответственно 30, 35, 40, 45, 50 и 60 мм/мин

Кривые на рисунке 1 построены следующим образом: при различных  $v$  и принятых значениях  $h_s$  или  $\delta$  каждой точке на кривых соответствует необходимое значение  $\alpha^*$ , обеспечивающее данное  $h_s$  или  $\delta$  и прогнозируемая при данном режиме литья температура поверхности слитка на уровне глубины лунки  $t_n(h_s)$ , т.е. 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  $\alpha^*$  и наоборот.

Приведенные расчетные зависимости с увеличением скорости литья до 60 мм/мин приобретают выраженный экстремальный характер. При этом при  $v = 40$  мм/мин можно допустить некоторое снижение интенсивности

охлаждения до  $\alpha^* = 6000-7000 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$  без существенного (менее 3%) увеличения глубины лунки слитка  $h_s$  и максимального размера двухфазной зоны  $\delta$ . Соответственно фиксируется возрастание температуры поверхности, что снижает вероятность трещинообразования вследствие уменьшения температурных градиентов по толщине слитка.

Важно отметить, что соответствующим подбором интенсивности охлаждения  $\alpha^*$  можно одновременно улучшить остальные характеристики процесса затвердевания. Полученные по результатам работы данные целесообразно использовать для обоснования технических требований и конструктивных решений систем охлаждения и регулирования подачи охладителя, которыми оснащаются агрегаты для непрерывного литья плоских слитков алюминиевых сплавов в ЭМК, а также для синтеза основных алгоритмов контроля и управления процессом в направлении повышения энергоэффективности производственного комплекса заготовительного литья слитков, обеспечения точности размеров и качества поверхности слитка и структуры литого металла. Дальнейшие перспективы развиваемого подхода определяются прежде всего ориентацией на поиск и реализацию оптимальных технологических режимов литья и конструктивных параметров ЭМК для основных деформируемых сплавов и типоразмеров слитков.

#### Список литературы

1. Гецелев З.Н., Балахонцев Г.А., Квасов Ф.И. и др. Непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор. – М.: Metallurgy, 1983. – 152 с.
2. Гецелев З.Н., Балахонцев Г.А., Черепок Г.В. Развитие и усовершенствование установок и технологии для отливки слитков алюминиевых сплавов в ЭМК // Цветные металлы. – 1980. – №2. – С. 59-63.
3. Напалков В. И., Черепок Г.В., Махов С.В., Черновол Ю.М. Непрерывное литье алюминиевых сплавов: справочник; ред. Напалков В.И. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 511 с.
4. Черепок Г.В., Якубович Е.А. Совершенствование технологии непрерывного литья слитков деформируемых алюминиевых сплавов // Высокие технологии в машиностроении: Материалы Всеросс. науч.-техн. интернет-конф. – Самара, СамГТУ, 2014. – С. 111-112.
5. Клявинь Я.Я., Клявиня И.Я. Метод прямого моделирования объекта по табличным данным // Препринт Ин-та физики АН Латв. ССР. – Рига, 1983. – 38 с.
6. 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.
7. Якубович Е.А. Анализ затвердевания непрерывного слитка по табличным данным // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2014. – №4(44). – С. 209-213.

#### References

1. Getselev Z.N., Balakhontsev G.A., Kvasov F.I. et al. Continuous casting into electromagnetic crystallizer. – M.: Metallurgy, 1983. – 152 p.

2. Getselev Z.N., Balakhontsev G.A., Cherepok G.V. Development and improvement of installations and technology for aluminum alloys ingots casting in EMC // Non-ferrous metals. 1980, no. 2, pp.59-63.
3. Napalkov V.I., Cherepok G.V., Makhov S.V., Chernovol Yu.M.; ed. Napalkov V.I. Continuous casting of aluminum alloys: reference book. – M.: Internet Engineering, 2005. – 511 p.
4. Cherepok G.V., Jakubovich E.A. Improvement of continuous casting technology of deformable aluminum alloys // High technology in mechanical engineering: Materials of the All-Russian Scientific and Technical internet conf. – Samara: SamSTU, 2014. – P. 111-112.
5. Klyavin Ya.Ya., Klyavinya I.Ya. The method of direct modeling of an object from tabular data // Preprint of the Institute of Physics of the Academy of Sciences of Latv. SSR. – Riga, 1983. – 38 p.
6. Yakubovich E.A. Approximate models of regression type for the analysis of solidification of continuous ingots of aluminum alloys // Bulletin of the Samara State Technical University. Ser. Technical science. 2013, no. 4 (40), pp. 222-224.
7. Yakubovich E.A. Analysis of solidification of a continuous ingot according to tabular data // Bulletin of the Samara State Technical University. Ser. Technical science. 2014, no. 4 (44), pp.209-213.

<b>Якубович Ефим Абрамович</b> – кандидат технических наук, профессор кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы» eyakubovich@mail.ru	<b>Yakubovich Efim Abramovich</b> – candidate of technical science, professor of the Department «Metal science, powder metallurgy, nanomaterials»
--	---

*Received 16.02.2023*