

УДК 621.746

## АНАЛИТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ РЕЖИМОВ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ КРУПНОТОННАЖНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ СЛИТКОВ. СООБЩЕНИЕ 2. ТЕПЛОВЫЙ РЕЖИМ СЛИТКОВ В ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ОТ РАЗЛИВКИ ДО ВЫДАЧИ В ПРОКАТНЫЙ СТАН

*Постольник Ю.С., д.т.н., профессор*

*Тимошпольский В.И.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор, директор по науке и новой технике (tree-89@mail.ru)*

*Трусова И.А.<sup>2</sup>, д.т.н., профессор, заведующая кафедрой металлургических технологий*

<sup>1</sup> ЗАО ПНИ СИТ «НЕФТЕГАЗСТРОЙИЗОЛЯЦИЯ»

(04136, Украина, г. Киев, ул. Маршала Гречко, 14)

<sup>2</sup> Белорусский национальный технический университет

(220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, д. 65)

**Аннотация.** Разработана аналитическая методика расчета затвердевания и охлаждения крупнотоннажного блюмингового слитка. В результате анализа исходной модели и полученных решений разработан универсальный способ расчета режима затвердевания и охлаждения слитка в промышленных условиях от разливки до посада в ячейку нагревательного колодца. Показано удовлетворительное согласование с результатами промышленного эксперимента при использовании аналитического номограммно-графического способа расчета. Способ расчета позволяет определить полное время затвердевания слитка и температуру поверхности в ходе затвердевания, положение фронта кристаллизации в заданный момент времени, продолжительность охлаждения перегретого расплава и другие параметры. При использовании аналитического и номограммно-графического способа расчета усовершенствована технология подготовки промышленного блюмингового слитка к нагреву и в дальнейшем откорректирован действующий режим нагрева слитка с повышенным теплосодержанием (жидкой сердцевиной), который апробирован и внедрен в промышленных условиях. Реализация режима показала сокращение времени нагрева слитков и снижение удельного расхода топлива.

**Ключевые слова:** крупнотоннажные слитки, затвердевание и охлаждение, тепловая обработка, метод эквивалентных источников, графо-аналитический способ, горячий посад, энергосберегающий режим.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-2-94-98

В настоящей работе показаны возможности использования методики расчета затвердевания и охлаждения слитка, базирующейся на методе эквивалентных источников [1, 2]. Методика прошла достаточно широкое тестирование по результатам промышленных экспериментов, численного интегрирования исходной задачи и решения по методу Л.С. Лейбензона.

В качестве примера использования разработанной методики приведем расчет слитка в технологической цепи охлаждения – нагрев. Исходные данные: масса слитка 8 т; материал – сталь 45; тип изложницы – сквозная чугунная; размеры слитка 0,734×0,655×2,8 м; толщина стенки изложницы  $\delta_{изл} = 195$  мм; температура заливки расплава  $T_0 = 1530$  °С; температура ликвидуса  $T_{лик} = 1490$  °С; температура солидуса  $T_{сол} = 1420$  °С; температура в зазоре  $T_{зал} = 900$  °С; температура подогрева изложницы  $T_{изл}^0 = 150$  °С; температура окружающего воздуха  $T_о = 30$  °С; скрытую теплоту кристаллизации примем равной  $q = 270$  кДж/кг;  $R_s = \sqrt{F/\pi}$ .

Промышленные эксперименты показывают, что температурный перепад между внутренней и наружной поверхностями изложницы в зависимости от

слитка, изложницы, условий разливки и т.д. может достигать значительной величины (порядка 300 °С). Внутренняя поверхность изложницы имеет температуру  $T_{изл}^{вн} = 700 - 800$  °С, а в начальный период и на отдельных участках – близкую к температуре плавления чугуна (1100 °С). Температура наружной поверхности составляет  $T_{изл}^{нар} = 400 - 500$  °С (при заливке в холодную изложницу) или превышает эту величину на температуру подогрева изложницы (при заливке в горячую изложницу) [3]. Поэтому основное назначение подогрева – уменьшение температурного перепада – позволяет снизить термонапряжения. В нашем случае примем  $\Delta T_{изл} = 250$  °С, тогда  $T_{изл}^{нар} = (400 + 500)/2 + 150 = 600$  °С;  $T_{изл}^{вн} = T_{изл}^{нар} + \Delta T_{изл} = 600 + 250 = 850$  °С.

Ориентировочную среднюю температуру затвердевшего слоя металла определим как

$$\bar{T}_1 = \frac{T_{лик} + T_{зал}}{2} = \frac{1490 + 900}{2} = 1195 \text{ °С.}$$

При температуре стали  $\bar{T}_1 = 1195$  °С ее теплофизические характеристики (теплопроводность, теплоемкость, плот-

ность) имеют следующие значения:  $\bar{\lambda}_1 = 29,8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ ;  $\bar{c}_1 = 0,66 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$ ;  $\bar{\rho}_1 = 7,41 \text{ т}/\text{м}^3$ .

Вычислим среднее значение коэффициента температуропроводности застывшего слоя металла и жидкой фазы (при  $T_2 = T_0$ ):

$$\bar{a}_1 = \frac{\bar{\lambda}_1}{\bar{c}_1 \bar{\rho}_1} = \frac{29,8 \cdot 3600}{0,66 \cdot 10^3 \cdot 7,41 \cdot 10^3} = 0,0219 \text{ м}^2/\text{ч};$$

$$\bar{a}_2 = \frac{\bar{\lambda}_2}{\bar{c}_2 \bar{\rho}_2} = \frac{30,6 \cdot 3600}{0,72 \cdot 10^3 \cdot 7 \cdot 10^3} = 0,0219 \text{ м}^2/\text{ч};$$

$$K_a = \frac{0,0219}{0,0219} = 1.$$

Приведенный коэффициент теплообмена  $\alpha_{13}$  рассчитаем по формуле А.И. Вейника [4]

$$\alpha_{13} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{зав}}} + \frac{R_2}{\lambda_{\text{изл}}} \ln \frac{R_{\text{изл}}}{R_3} + \frac{R_3}{R_{\text{изл}} (\alpha_{\text{рад}}^{\text{нар}} + \alpha_{\text{конв}}^{\text{нар}})}}.$$

Другие неизвестные значения  $\alpha$  определим по графикам (рис. 1). При построении графиков критери-

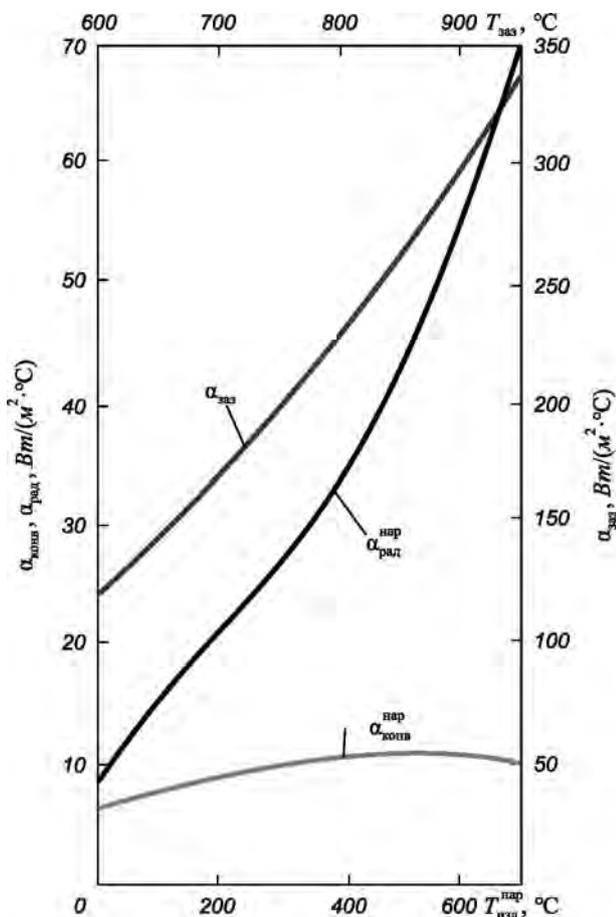


Рис. 1. Зависимость коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_{\text{зав}}$ ,  $\alpha_{\text{рад}}^{\text{нар}}$ ,  $\alpha_{\text{конв}}^{\text{нар}}$  от температуры

Fig. 1. Dependence of heat-transfer coefficients  $\alpha_{\text{зав}}$ ,  $\alpha_{\text{рад}}^{\text{нар}}$ ,  $\alpha_{\text{конв}}^{\text{нар}}$  on temperature

альные числа  $Bi_1$  принимали равными 0,25; 0,5; 0,75; 1,0, так как опыт практической работы показывает, что для массивных стальных слитков, охлаждаемых в изложнице и на воздухе, число  $Bi_1$  не превышает единицы. Промежуточные величины легко получить, используя линейную интерполяцию. В соответствии с рис. 1 имеем  $\alpha_{\text{зав}} = 300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ ;  $\alpha_{\text{рад}}^{\text{нар}} = 55 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ ;  $\alpha_{\text{конв}}^{\text{нар}} = 11 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ . Тогда получим

$$\alpha_{13} = \frac{1}{\frac{1}{300} + \frac{0,391}{35,5} \ln \frac{0,586}{0,391} + \frac{0,391}{0,586 (55 + 11)}} = 55,73 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}).$$

Далее вычисляем числа  $Bi$ , Коссовича ( $Ko$ ), Пестельника ( $По$ ) [1]:

$$Bi_1 = \frac{\alpha_{13} R_3}{\bar{\lambda}_1} = \frac{55,73 \cdot 0,391}{29,8} = 0,731;$$

$$Ko = \frac{q \bar{\rho}_2}{\bar{c}_1 \bar{\rho}_1 (T_{\text{сол}} - T_c)} = \frac{270 \cdot 7}{0,66 \cdot 7,41 (1420 - 30)} = 0,28;$$

$$По = \frac{q}{\bar{c}_2 (T_0 - T_{\text{лик}})} = \frac{270}{0,72 (1530 - 1490)} = 9,4.$$

По графикам, приведенным на рис. 2, определяем значения следующих параметров:

$$H^* = \tau^* / Ko = 0,95; \tau^* = 0,95 \cdot 0,28 = 0,266;$$

$$\bar{\beta}_1 Ko = 0,12; \bar{\beta}_1 = 0,12 / 0,28 = 0,432;$$

$$\bar{\beta}_2 По = 0,404; \bar{\beta}_2 = 0,404 / 9,4 = 0,043,$$

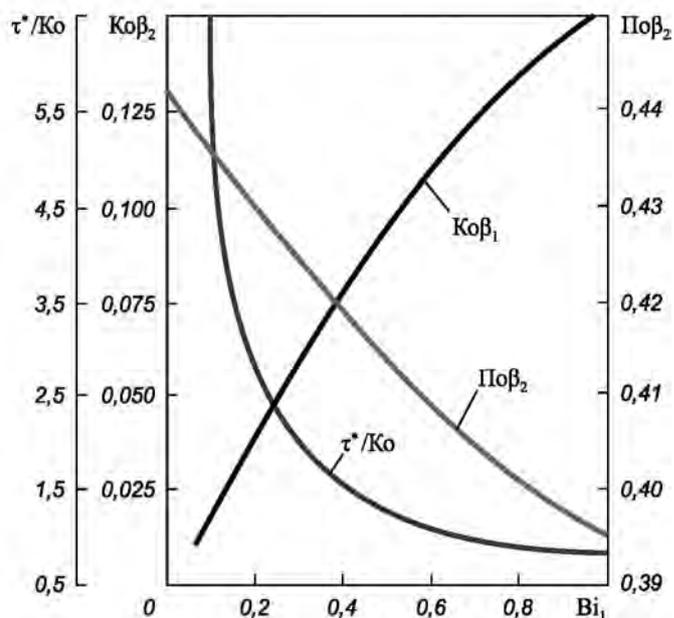


Рис. 2. Графики изменения  $\tau^*/Ko$ ,  $Ko\bar{\beta}_1$ ,  $По\bar{\beta}_2$  в зависимости от величины числа  $Bi_1$

Fig. 2. Change charts of  $\tau^*/Ko$ ,  $Ko\bar{\beta}_1$ ,  $По\bar{\beta}_2$  in dependence on the ratio of  $Bi_1$

где  $H^*$  – функция, учитывающая закон продвижения фронта кристаллизации во времени (по решению Лейбензона);  $\tau^*$  – время затвердевания слитка (по решению Лейбензона);  $\bar{\beta}_1$  и  $\bar{\beta}_2$  – поправочные функции, учитывающие теплосодержание твердой и жидкой фаз (перегрев) при расчете толщины затвердевшего слоя.

По формуле (6) предыдущей работы [1] вычисляем время полного затвердевания в относительных ( $\bar{\tau}$ ) и абсолютных ( $\bar{t}$ ) единицах:

$$\bar{\tau} = 0,266(1 + 0,432 + 0,043) = 0,392;$$

$$\bar{t} = \frac{\bar{\tau} R_s^2}{\bar{a}_1} = \frac{0,392 \cdot 0,391^2}{0,0219} = 2,74 \text{ ч.}$$

Для оценки адекватности аналитических расчетов в дальнейшем выполнено сравнение с данными промышленного эксперимента для 8-т блюмингового слитка. Такой подход использован ранее [3], а также в работах других исследователей (например [5]). В конкретном случае расхождение расчетного (2,74 ч) и экспериментального (2,75 ч) времени полной кристаллизации блюмингового слитка составляет 0,4 %, что можно считать вполне удовлетворительным как по точности, так и по простоте расчетов. Если не учитывать теплосодержание твердой и жидкой фаз, продолжительность затвердевания будет равна 1,86 ч, что на 32 % меньше реальной.

Для расчета температуры поверхности слитка  $\bar{T}_1$  в момент его полного затвердевания по графикам, представленным на рис. 3, находим  $\omega_1 Ko = 0,07$ ;  $\omega_1 = 0,07/0,28 = 0,25$ ;  $\omega_2 Po = 0$ ;  $\omega_2 = 0$ ;  $\Psi_n Ko = 0,063$ ;  $\Psi_n = 0,063/0,28 = 0,225$ ;  $\Phi_n = 0,345$ ; здесь  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – поправочные функции, учитывающие теплосодержание твердой и жидкой фаз (перегрев) при расчете температурного слоя;  $\Psi_n$ ,  $\Phi_n$  – безразмерные параметры. Подставив полученные данные в формулу [2]

$$\theta_n(l) = \Phi_n(l) + \frac{\Psi_n(l)}{1 + \omega_1(l) + \omega_2(l)}, \quad (1)$$

получим

$$\theta_n(l) = 0,345 + \frac{0,225}{1 + 0,25 + 0} = 0,525;$$

$$T_n = T_c + (T_{\text{сол}} - T_c)\theta_n = 30 + (1420 - 30) \cdot 0,525 = 760 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Ранее, при определении средних значений теплофизических характеристик металла, принимали среднюю температуру равной 1195 °С. Если же вычислить среднюю температуру слитка как

$$\bar{T}_1 = \frac{T_{\text{сол}} - T_n}{2} = \frac{1420 + 760}{2} = 1090 \text{ }^\circ\text{C,}$$

то очевидно, что она отличается от ранее принятой на 9 %. С целью достижения необходимого результата расчет можно повторить, задаваясь  $T_n$ .

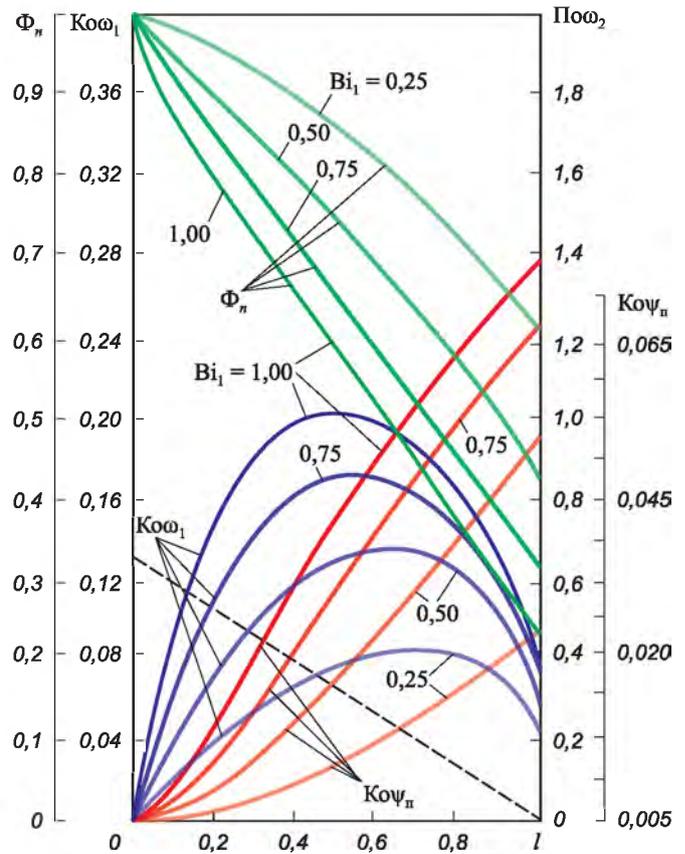


Рис. 3. Графики изменения  $\Phi_n$ ,  $Ko\omega_1$ ,  $Po\omega_2$ ,  $Ko\Psi_n$  в зависимости от толщины затвердевшего слоя

Fig. 3. Change charts of  $\Phi_n$ ,  $Ko\omega_1$ ,  $Po\omega_2$ ,  $Ko\Psi_n$  in dependence on the thickness of hardened layer

Как правило, в соответствии с действующими технологическими инструкциями отлитые в изложницы слитки поступают в стрипперное отделение не полностью затвердевшими [6, 7]. Снятие изложницы («раздевание») наиболее эффективно при достаточно высоком теплосодержании слитка при наличии жидкой сердцевины на уровне 20 % и выше. К этому стремятся все без исключения специалисты (теплотехники и технологи) ввиду значительной (до 40 – 50 %) экономии топливно-энергетических ресурсов в отделениях регенеративных и рекуперативных нагревательных колодцев [8 – 10].

Далее используем в расчетах графики, приведенные на рис. 3 и 4.

С учетом приведенных выше математических зависимостей в целом вся методика расчета сводится к определению:

- температуры на поверхности слитка в ходе затвердевания (1);
- времени полного затвердевания слитка

$$\bar{\tau} = \tau^* (1 + \bar{\beta}_1 + \bar{\beta}_2); \quad (2)$$

- положения фронта кристаллизации в заданный момент времени

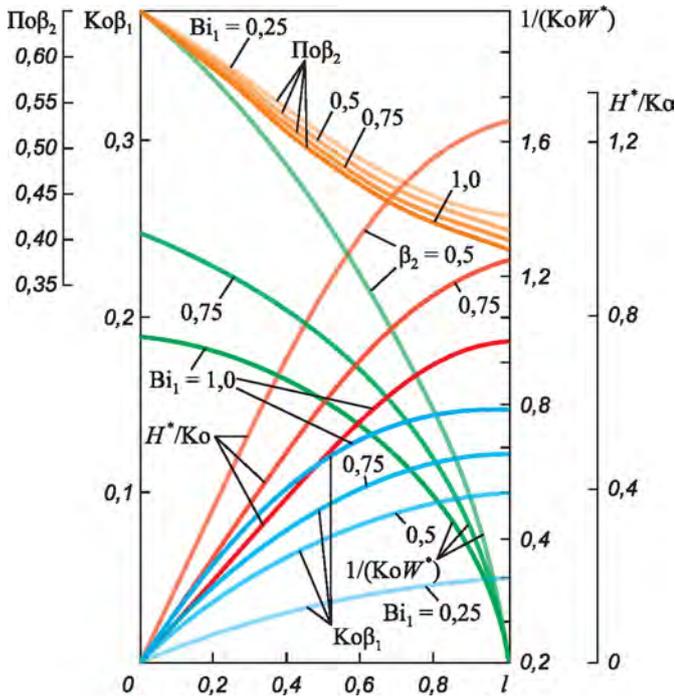


Рис. 4. Изменение  $H^*/K_o$ ,  $K_o\beta_1$ ,  $P_o\beta_2$ ,  $1/(K_oW^*)$  в зависимости от толщины затвердевшего слоя

Fig. 4. Changes of  $H^*/K_o$ ,  $K_o\beta_1$ ,  $P_o\beta_2$ ,  $1/(K_oW^*)$  in dependence on the thickness of hardened layer

$$H^*(l)[1 + \beta_1(l) + \beta_2(l)] = \frac{\tau - \tau_0}{K_e K_o}; \quad (3)$$

– продолжительности охлаждения перегретого расплава до момента начала затвердевания

$$\tau_0 = \frac{1}{3(1+n)Bi_2} \left\{ \left( 1 + \frac{Bi_2}{4} \right) - \frac{2 + 3Bi_2 + Bi_2^2}{Bi_2} \times \right. \\ \left. \times \ln \left( 1 + \frac{Bi_2}{4} \right) + (3 + Bi_2) \ln(1 + K_T) \right\}. \quad (4)$$

С целью практического использования изложенного способа расчета представляется возможным определить параметры, входящие в выражения (1) – (4), с помощью разработанных графиков-номограмм (рис. 1 – 4), что позволяет исследовать технологию подготовки слитков к нагреву графо-аналитическим способом. Такой способ значительно упрощает всю процедуру вычислений для слитков классической геометрии. Эффективность этого приема в вычислениях доказана множеством публикаций известных ученых металлургов-теплофизиков.

В соответствии с разработанной схемой вычислений выполнены расчеты затвердевания и времени транспортировки крупнотоннажных блюминговых слитков различных марок стали до отделения нагревательных колодцев блюмингов 1150 и 1250 металлургических комбинатов Днепропетровского и «Криворожсталь» (см. таблицу).

В соответствии с разработанным способом расчета режимов затвердевания и охлаждения слитков совмест-

но с заводскими специалистами была усовершенствована технология подачи слитков горячего посада в ячейку рекуперативных нагревательных колодцев блюминга-2 «Криворожсталь» и предложен новый режим нагрева слитков с жидкой сердцевиной, что позволило сократить продолжительность нагрева практически на 1,3 ч и уменьшить удельный расход условного топлива на 1,4 кг у.т./т (рис. 5).

**Выводы.** Разработан способ расчета режима затвердевания и охлаждения блюмингового слитка в технологической цепи от разливки до посада в ячейку нагревательного колодца. В соответствии с принятой схемой термического слоя и применением в качестве математического аппарата МЭИ выполнен пример расчета с целью уточнения времени полного затвердевания, при этом достигнуто удовлетворительное согласование с результатами промышленного эксперимента при использовании аналитического номограммно-графического способа расчета. Показана эффективность применения аналитической теории затвердевания и охлаждения крупных блюминговых слитков в действующей технологии транспортировки слитка к ячейке нагревательного колодца и последующего нагрева слитка с жидкой сердцевиной. В промышленных условиях достигнуто сокращение времени нагрева слитков и снижение удельного расхода топлива.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Постольник Ю.С., Тимошпольский В.И., Трусова И.А. Аналитические расчеты режимов затвердевания крупнотоннажных промышленных слитков. Сообщение 1. Математическая по-

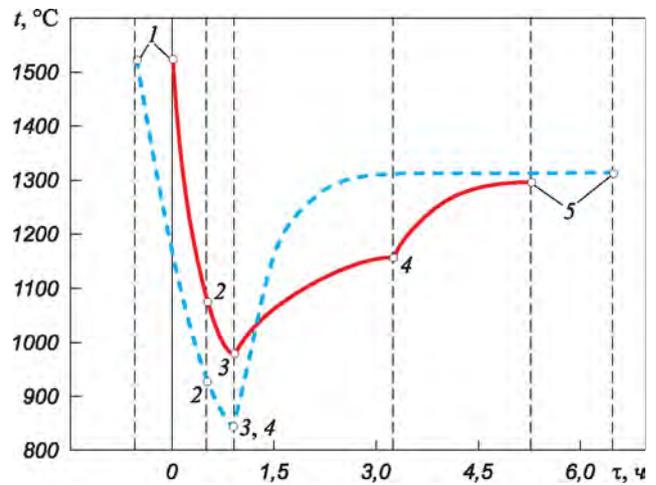


Рис. 5. Динамика температуры поверхности слитков массой 12,5 т от разливки до выдачи из нагревательной ячейки:

- 1 – конец разливки; 2 – разделение слитка; 3 – посад в нагревательный колодец; 4 – подача топлива; 5 – выдача в прокат;
- — — действующий режим; — — — предложенный режим

Fig. 5. Temperature dynamics of the ingot surface with a mass of 12.5 tones from the casting to the output from the heating cell: 1 – end of casting; 2 – stripping; 3 – charging into a soaking-pit furnace; 4 – fuel supply; 5 – rolling output; — — — operating mode; — — — offered mode

- становка задачи и вывод расчетных соотношений для схемы термического слоя // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 8. С. 550 – 556.
2. Тимошпольский В.И., Постольник Ю.С., Андрианов Д.Н. Теоретические основы теплофизики и термомеханики в металлургии. – Минск: Бел. наука, 2005. – 560 с.
  3. Самойлович Ю.А., Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Филиппов В.В. Стальной слиток: В 3-х т. Т. 2. Затвердевание и охлаждение / Под общ. ред. В.И. Тимошпольского, Ю.А. Самойловича. – Минск: Бел. наука, 2000. – 637 с.
  4. Вейник А.И. Теория затвердевания отливки. – М.: ГНТИ машиностроительной литературы, 1960. – 435 с.
  5. Базайкина О.Л., Темлянец М.В. Расчет нагрева и охлаждения восьмигранных кузнечных слитков при граничных условиях III рода // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 12. С. 29 – 33.
  6. Гольдфарб Э.М., Судоплатов Л.В., Саксаганский А.М. Затвердевание и охлаждение слитков перед посадкой в нагревательные колодцы // Изв. вуз. Черная металлургия. 1963. № 3. С. 195 – 202.

7. Котляревский Е.М., Минеев В.Н., Баженов А.В. и др. Разработка, экспериментальная проверка и практическое применение модели нагрева слитков в колодцах // Сталь. 1976. № 7. С. 665 – 668.
8. Девятов Д.Х. Математическая модель охлаждения и нагрева слитков с незавершенным процессом затвердевания в нагревательных колодцах // Изв. вуз. Черная металлургия. 1980. № 10. С. 100 – 102.
9. Миткалинный В.И., Хлопонин В.Н., Барбаев В.И. Нагрев слитков с жидкой сердцевиной в нагревательных колодцах с отоплением из центра пода // Изв. вуз. Черная металлургия. 1983. № 7. С. 126 – 130.
10. Тимошпольский И.С., Тимошпольский В.И., Шендрик Б.Ф., и др. Закономерности нагрева слитков горячего посада // Сталь. 1989. № 9. С. 97 – 100.

Поступила 21 сентября 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 2, PP. 94–98.

## ANALYTICAL CALCULATIONS OF SOLIDIFICATION AND COOLING PROCESSES IN LARGE-TONNAGE COMMERCIAL INGOTS. REPORT 2. THERMAL CONDITIONS OF INGOT IN HEAT-TECHNOLOGICAL PROCESSING CHAIN FROM CASTING TO FEEDING TO A ROLLING MILL

*Postol'nik Yu.S., Timoshpol'skii V.I.<sup>1</sup>, Trusova I.A.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> CJSC PII SIT “NEFTEGAZSTROIIZOLYATSIYA”, Kiev, Ukraine

<sup>2</sup> Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

**Abstract.** The article is devoted to the development of the analytical design procedure of solidification and cooling of large-tonnage bloom ingot. As the analysis result of the reference model and the received solutions, a universal way has been worked out to calculate the mode of solidification and cooling of ingot in the industrial conditions from the casting to charging into the cell of soaking-pit furnace. The satisfactory matching with the results of the industrial experiment has been shown when using the analytical nomogram-graphical method of the calculation. The way of calculation allows defining the total time of ingot solidification and the surface temperature in the process of solidification, condition of crystallization front in a set moment of time, duration of cooling of the overheated melt and other parameters. When using the analytical and nomogram-graphical method of the calculation, the preparation technology of industrial bloom ingot to the heat has been improved, as well as corrected the operating heating mode of ingot with the increased heat content (liquid kernel), which has been tested and implemented in industrial conditions. Realization of the mode has shown the heating time reduction of ingots and the decrease of fuel rate.

**Keywords:** large-tonnage ingots, solidification, cooling, heat treatment, method of equivalent sources, graphic-analytical way, hot charging, energy saving mode.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-2-94-98

### REFERENCES

1. Postol'nik Yu.S., Timoshpol'skii V.I., Trusova I.A. Analytical calculations of solidification and cooling processes in large-tonnage commercial ingots. Report 1. Mathematical formulation of the problem and derivation of correlations for a thermal layer scheme. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya. = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2015, no. 8, pp. 550–556. (In Russ.).
2. Timoshpol'skii V.I., Postol'nik Yu.S., Andrianov D.N. *Teoreticheskie osnovy teplofiziki i termomekhaniki v metallurgii* [Theoretical foundations of thermal physics and thermal mechanics in metallurgy]. Minsk: Bel. nauka, 2005, 560 p. (In Russ.).

3. Samoilovich Yu.A., Timoshpol'skii V.I., Trusova I.A., Filippov V.V. *Stal'noi slitok: v 3-kh t. T. 2. Zatverdevanie i okhlazhdenie* [Steel Ingot: in 3 vols. Vol. 2. Solidification and cooling]. Minsk: Bel. nauka, 2000, 637 p. (In Russ.).
4. Veinik A.I. *Teoriya zatverdevaniya otlivki* [Casting solidification theory]. Moscow: Mashgiz, 1960. 434 p. (In Russ.).
5. Bazaikina O.L., Temlyantsev M.V. Heating and cooling calculation of eight-faced forging ingots with boundary condition of the 3-rd kind. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya. = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2011, no. 12, pp. 29–33. (In Russ.).
6. Gol'dfarb E.M., Sudoplatov L.V., Saksaganskii A.M. Solidification and cooling of ingots before the charging into soaking-pit furnaces. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya. = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 1963, no. 3, pp. 195–202. (In Russ.).
7. Kotlyarevskii E.M., Mineev V.N., Bazhenov A.V. etc. Development, experimental test and practical usage of the ingot heating model in soaking-pit furnaces. *Stal'.* 1976, no. 7, pp. 665–668. (In Russ.).
8. Devyatov D.Kh. Mathematical model of cooling and heating of ingots with an incomplete process of solidification in soaking-pit furnaces. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya. = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 1980, no. 10, pp. 100–102. (In Russ.).
9. Mitkalinniy V.I., Khloponin V.N., Barbaev V.I. Heating of ingots with a liquid kernel in soaking-pit furnaces with the heating from the center of sole. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya. = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 1983, no. 7, pp. 126–130. (In Russ.).
10. Timoshpol'skii I.S., Timoshpol'skii V.I., Shendrik B.F., Sevast'yanov P.V., Gurvich E.A., Trusova I.A. Heating regularities of hot-charged ingots. *Stal'.* 1989, no. 9, pp. 97–100. (In Russ.).

### *Information about the authors:*

*Postol'nik Yu.S., Dr. Sci. (Eng.), Professor*

*Timoshpol'skii V.I., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of Science and Advanced Technology Engineering (tree-89@mail.ru)*

*Trusova I.A., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Metallurgical Technologies*

Received January 21, 2015