

АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ, ОХЛАЖДЕНИЯ И НАГРЕВА СТАЛЬНЫХ СЛИТКОВ

В статье разработан алгоритм, позволяющий оптимизировать режимы затвердевания, охлаждения и нагрева стальных слитков, разливаемых в изложницы, охлаждающихся на воздухе и в термостате, и нагреваемых в печах камерного типа. Цель оптимизации – минимизация необходимой длительности нагрева слитка в печи, при которой достигается заданное качество нагрева, максимальная производительность печи, минимальный расход условного топлива, и минимальные потери металла в печи от окисления.

Стальной слиток, оптимальный режим нагрева, максимальная производительность нагревательной печи.

The authors of the article developed the algorithm allowing optimizing the modes of solidification, cooling and heating of steel ingot cast in mould, cooling in the air and thermostat, heated in the chamber heat stove. The optimization goal is minimization of the necessary duration of ingot heating in the stove, at which the required heating quality, maximum of the stove capacity, minimums of fuel consumption and the waste of metal due to oxidation are achieved.

Steel ingot, optimal mode of heating, maximum of the heating stove capacity.

В большинстве работ, посвященных оптимизации тепловой работы нагревательных печей, речь идет о нагреве холодных стальных заготовок, помещаемых в печи. Таким образом, нагревательная печь рассматривается в отрыве от разливочного агрегата (изложницы, машины непрерывного литья заготовок). Известно, что на выходе из разливочного агрегата стальная заготовка (слиток, сляб) имеет высокую среднемассовую температуру (порядка 1000 °С), однако по разным причинам физическая теплота разлитых заготовок в настоящее время не используется или используется частично.

В работах [1], [2] показано, что для сохранения физической теплоты слитков, извлекаемых из изложниц, в процессе транспортировки до нагревательной печи необходимо использовать термостаты. Была разработана математическая модель затвердевания слитка в изложнице, охлаждения на воздухе и в термостате и нагрева в печи, реализованная на языке программирования Visual Basic, позволяющая рассчитывать температурное поле слитка на всех этапах: в изложнице, на воздухе, в термостате, снова на воздухе и в нагревательной печи. Исходные данные для расчета температурного поля слитка включают в себя:

- геометрические характеристики (Г): эквивалентные внутренний и внешний диаметры изложницы, в общем случае переменные по высоте изложницы; высота изложницы; высота прибыльной части слитка; толщина поддона; ширина, длина, высота внутреннего пространства термостата; толщина изоляции термостата; толщина кирпичного основания термостата; ширина, длина, высота рабочего пространства внутренней печи;

- температурные условия (ТУ): начальная температура жидкой стали; начальные температуры стенки изложницы и поддона; температура окружающего воздуха; температура в рабочем пространстве камерной печи;

- временные условия (ВУ): длительности нахождения слитка в изложнице $\tau_{изл}$, на воздухе после изложницы $\tau_{в1}$, в термостате $\tau_{терм}$, на воздухе после термостата $\tau_{в2}$, в нагревательной печи $\tau_{нагр}$;

- условно постоянные теплофизические параметры (ТФП): степени черноты поверхности слитка, наружной поверхности стенки изложницы и внутренней поверхности термостата; приведенная степень черноты от греющих газов и кладки к металлу; коэффициенты теплоотдачи от слитка к поддону и от поддона к полу помещения цеха.

В специальном блоке программы рассчитываются переменные теплофизические параметры (ТФП): коэффициенты теплопроводности, плотности, теплоемкости стали (материал слитка), чугуна (материала изложницы и поддона), тепловой изоляции термостата в зависимости от температуры.

Эффективность работы нагревательной печи характеризуется ее производительностью Π , т.е. количеством нагретого металла в единицу времени, т/ч, и качеством нагрева слитка. Производительность печи определяется выражением:

$$\Pi = m / \tau_{нагр},$$

где m – масса слитка (слитков), загружаемого в печь, т; $\tau_{нагр}$ – продолжительность нагрева слитка в печи, ч. То есть для слитка данного типа производительность тем выше, чем меньше продолжительность нагрева слитка $\tau_{нагр}$. Масса слитка однозначно определяется геометрическими размерами изложницы и маркой стали (М).

Качество нагрева слитка для камерных печей можно определить максимальной разностью температур в печи и температуры слитка ΔT_{max} , которая как правило имеет место на оси слитка:

$$\Delta T_{max} = \max |T_{печ} - T_{оси}|,$$

где $T_{\text{оси}}$ – температура на оси слитка. Чем меньше величина ΔT_{max} , тем выше качество нагрева. Величина ΔT_{max} на практике всегда больше нуля, так как условие $\Delta T_{\text{max}} = 0$ требует бесконечного времени нахождения слитка в печи.

Качество нагрева слитка является функцией следующих факторов:

$$\Delta T_{\text{max}} = f_1(\tau_{\text{нагр}}, \tau_{\text{изл}}, \tau_{\text{в1}}, \tau_{\text{терм}}, \tau_{\text{в2}}, \Gamma, \text{ТУ}, \text{ТФП}).$$

С другой стороны, продолжительность нагрева $\tau_{\text{нагр}}$ сама может являться функцией требуемого качества нагрева ΔT_{max} и других факторов:

$$\tau_{\text{нагр}} = f_2(\Delta T_{\text{max}}, \tau_{\text{изл}}, \tau_{\text{в1}}, \tau_{\text{терм}}, \tau_{\text{в2}}, \Gamma, \text{ТУ}, \text{ТФП}). \quad (1)$$

К второстепенным показателям эффективности работы печи можно отнести удельный расход топлива в печи PT и потери металла от окисления $ПМ$. Удельный расход топлива приблизительно обратно пропорционален производительности печи или прямо пропорционален времени нагрева: $PT \sim \tau_{\text{нагр}}$.

Потери металла от окисления приблизительно пропорциональны корню квадратному от времени нагрева слитка: $ПМ \sim \sqrt{\tau_{\text{нагр}}}$. То есть чем меньше продолжительность нагрева слитка в печи, тем меньше удельный расход топлива и потери металла от окисления.

На рис. 1. показан алгоритм расчета качества нагрева слитка ΔT_{max} , или необходимой длительности нагрева слитка в печи $\tau_{\text{нагр}}$, предполагающий использование разработанной компьютерной программы для расчета температурного поля слитка в изложнице, на воздухе, в термостате, снова на воздухе и в нагревательной печи.

Считая длительность нахождения слитка в изложнице $\tau_{\text{изл}}$ переменной величиной, а все остальные факторы – неизменными, из (1) можно получить зависимость:

$$\tau_{\text{нагр}} = f_3(\Delta T_{\text{max}}, \tau_{\text{изл}}).$$

Поскольку для крупных слитков скорость изменения температурного поля определяется в большей степени внутренним теплообменом за счет теплопроводности внутри слитка, и в меньшей степени – внешним теплообменом на поверхности слитка, то необходимое время нагрева $\tau_{\text{нагр}}$ должно приблизительно определяться суммарным временем охлаждения слитка в изложнице, на воздухе и в термостате $\tau_{\text{охл}}$:

$$\tau_{\text{нагр}} \cong f_4(\Delta T_{\text{max}}, \tau_{\text{охл}}), \quad (2)$$

где $\tau_{\text{охл}} = \tau_{\text{изл}} + \tau_{\text{в1}} + \tau_{\text{терм}} + \tau_{\text{в2}}$.

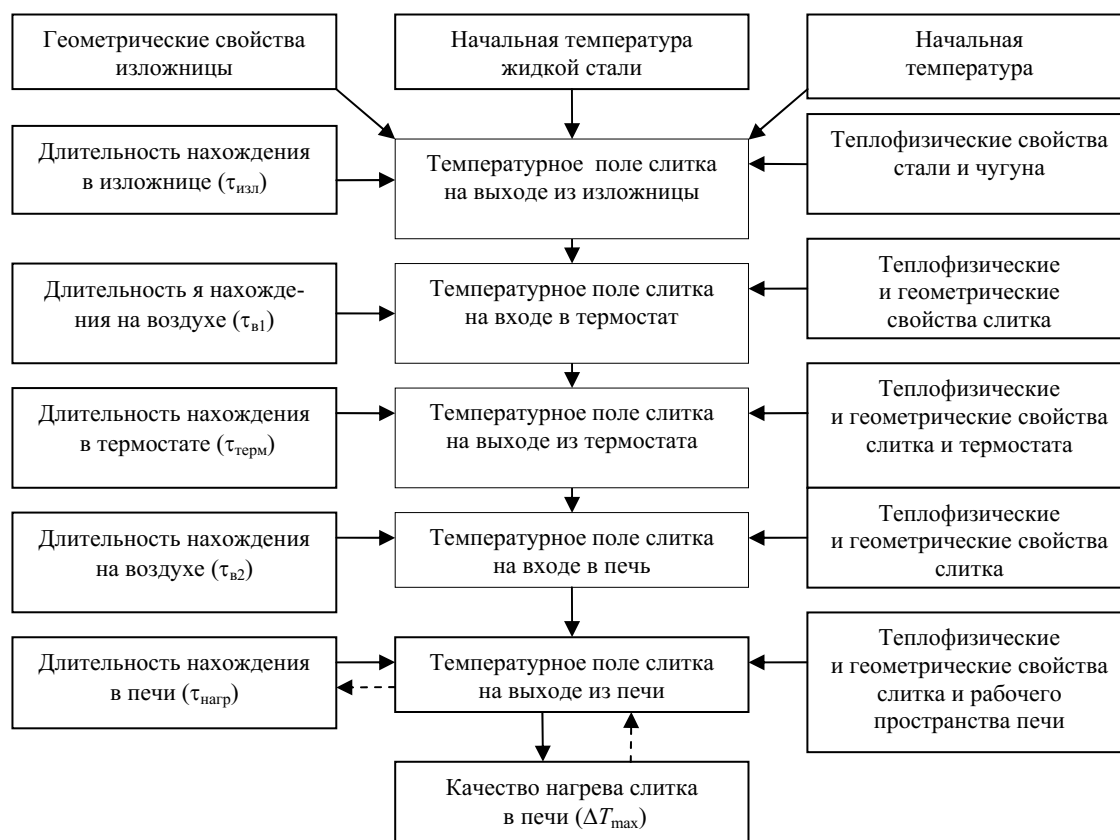


Рис. 1. Алгоритм расчета ΔT_{max} или $\tau_{\text{нагр}}$

На рис. 2 показана номограмма, отражающая зависимость (2) и позволяющая приближенно определять необходимое время нагрева $\tau_{\text{нагр}}$ от качества нагрева ΔT_{max} и времени охлаждения $\tau_{\text{охл}}$ для цилиндрического слитка Р-4,5 постоянного диаметра 582 мм, длиной 2000 мм (без прибыли), массой 4,5 т для стали марки 08Х18Н10Т.

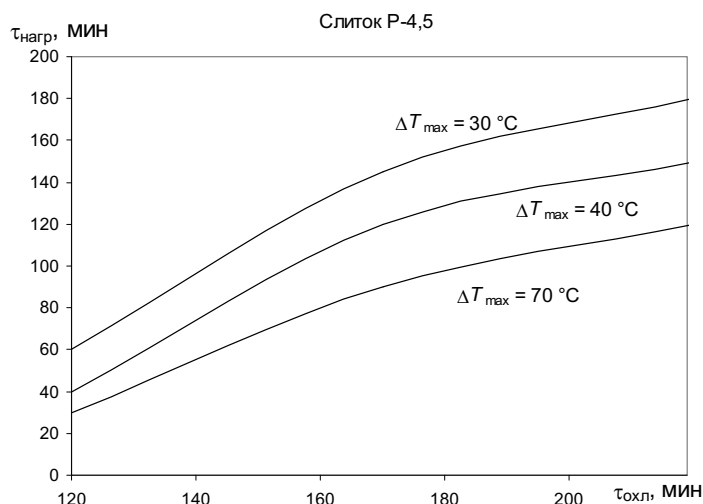


Рис. 2. Номограмма для определения $\tau_{\text{нагр}}$ для слитка Р-4,5

Из номограммы на рис. 2 следует, что чем выше качество нагрева (т.е. меньше ΔT_{max}) и больше суммарное время охлаждения $\tau_{\text{охл}}$, тем больше необходимая продолжительность нагрева в печи $\tau_{\text{нагр}}$. При уменьшении $\tau_{\text{охл}}$ при заданном ΔT_{max} , время нагрева $\tau_{\text{нагр}}$ значительно уменьшается. Так при $\tau_{\text{охл}} = 220$ мин. (как в исходном варианте) при $\Delta T_{\text{max}} = 30^\circ\text{C}$ время нагрева составляет $\tau_{\text{нагр}} = 180$ мин.; при $\tau_{\text{охл}} = 125$ мин. получается $\tau_{\text{нагр}} = 60$ мин.

Таким образом, при уменьшении суммарной продолжительности охлаждения слитка в изложнице, на воздухе и в термостате $\tau_{\text{охл}}$ при неизменных остальных параметрах необходимая длительность нагрева в печи $\tau_{\text{нагр}}$ при заданном качестве нагрева уменьшается, или, наоборот, качество нагрева при заданной длительности нагрева возрастает. Если принять для простоты, что длительности нахождения слитка на воздухе и в термостате являются постоянными ($\tau_{\text{в1}} = \text{const}$, $\tau_{\text{терм}} = \text{const}$, $\tau_{\text{в2}} = \text{const}$), то уменьшение длительности выдержки слитка в изложнице $\tau_{\text{изл}}$ будет приводить к уменьшению необходимой длительности нагрева $\tau_{\text{нагр}}$. Физически это понятно: чем меньше слиток охлаждается в изложнице, на воздухе и в термостате, тем больше его теплосодержание при поступлении в нагревательную печь, и тем меньше теплоты нужно подвести к слитку в печи, чтобы нагреть его до нужной температуры. Однако нужно иметь в виду, что для крупных слитков (таких как Р-4,5) внутренний теплообмен играет более значительную роль, чем внешний. При помещении слитка в печь его поверхность довольно быстро прогревает-

ся до температуры, близкой к температуре в печи, и теплообмен между слитком и рабочим пространством печи становится минимальным. Выравнивание температуры слитка по его сечению происходит за счет внутреннего теплообмена, и скорость этого выравнивания зависит главным образом от распределения температуры по сечению слитка в момент его загрузки в печь.

Если в момент загрузки слитка в печь температура на оси слитка $T_{\text{оси}}$ меньше температуры в рабочем пространстве печи $T_{\text{печ}} = \text{const}$ и больше температуры на поверхности слитка $T_{\text{пов}}$ ($T_{\text{печ}} > T_{\text{оси}} > T_{\text{пов}}$), то после загрузки слитка в печь температура на поверхности $T_{\text{пов}}$ будет быстро возрастать, стремясь к температуре в печи, а температура на оси $T_{\text{оси}}$ будет еще некоторое время понижаться, и, лишь спустя некоторое время, начнет возрастать. В какой-то момент нагрева температура на поверхности слитка превысит температуру на оси, и процесс выравнивания температуры по сечению слитка будет протекать при условии ($T_{\text{оси}} < T_{\text{пов}} < T_{\text{печ}}$).

При уменьшении времени выдержки слитка в изложнице $\tau_{\text{изл}}$ температура на оси слитка $T_{\text{оси}}$ в момент загрузки в печь возрастает, и при определенном значении $\tau_{\text{изл}}$ температура $T_{\text{оси}}$ в момент $\tau = \tau_{\text{охл}}$ (т.е. в момент загрузки в печь) может превысить температуру в печи $T_{\text{печ}}$ ($T_{\text{оси}} > T_{\text{печ}}$). Однако, так как температура на поверхности слитка в этот момент меньше температуры печи ($T_{\text{пов}} < T_{\text{печ}}$), то после загрузки слитка в печь температура на оси продолжит понижаться и может в некоторый момент стать ниже температуры в печи, температура же на поверхности после загрузки быстро возрастает, стремясь к температуре в печи, и в какой-то момент становится больше, чем температура на оси. Таким образом, в данном случае процесс выравнивания температуры по сечению слитка также будет происходить при условии $T_{\text{оси}} < T_{\text{пов}} < T_{\text{печ}}$, однако необходимая длительность нагрева при заданном качестве будет меньше, чем в предыдущем случае.

При дальнейшем уменьшении длительности выдержки в изложнице $\tau_{\text{изл}}$ может возникнуть оптимальный режим, когда при загрузке слитка в печь температура на оси превышает температуру в печи ($T_{\text{оси}} > T_{\text{печ}}$), а температура поверхности ниже температуры в печи ($T_{\text{пов}} < T_{\text{печ}}$). После загрузки слитка в печь температура на его оси монотонно понижается, оставаясь больше температуры в печи, а температура на поверхности монотонно возрастает, оставаясь меньше температуры в печи. В этом случае выравнивание температуры по сечению слитка происходит при условии $T_{\text{оси}} > T_{\text{печ}} > T_{\text{пов}}$.

Рассмотрим, что будет, если еще уменьшить длительность выдержки слитка в изложнице $\tau_{\text{изл}}$ по сравнению с оптимальным режимом. В этом случае температуры на оси слитка и на поверхности слитка в момент загрузки в печь еще больше возрастут. После загрузки слитка в печь температура на оси будет монотонно понижаться, а температура на поверхно-

сти – быстро возрастая, и в какой-то момент температура на поверхности превысит температуру в печи, и дальнейшее выравнивание температуры по сечению слитка будет протекать при условии: $T_{оси} > T_{пов} > T_{печ}$. В данном случае после загрузки слитка в печь теплота к слитку сначала будет подводиться из рабочего пространства печи (пока $T_{пов} < T_{печ}$), затем будет отводиться от слитка в печь (когда $T_{пов} > T_{печ}$), в результате чего процесс выравнивания температуры по сечению слитка затягивается по сравнению с оптимальным вариантом.

На основе этих положений разработан алгоритм определения оптимального времени нахождения слитка в изложнице $\tau_{изл,опт}$ и минимально необходимой длительности нагрева слитка в печи $\tau_{нагр, min}$. Схема данного алгоритма показана на рис. 3.

В начале алгоритма задаются исходные параметры: геометрические условия (ГУ), температурные условия (ТУ), теплофизические параметры (ТФП),

временные условия ($\tau_{изл}$, $\tau_{в1}$, $\tau_{терм}$, $\tau_{в2}$). В процессе оптимизации варьируемой величиной является длительность выдержки слитка в изложнице $\tau_{изл}$, остальные параметры принимаются постоянными.

С помощью разработанной компьютерной программы при исходных параметрах рассчитывается температурное поле слитка на входе в печь и определяется среднемассовая температура слитка на входе в печь T_m , удовлетворяющая условию

$$h(T_m) \cdot m = Q(\tau_{охл}),$$

где $h(T_m)$ – удельная энтальпия стали, кДж/кг, при среднемассовой температуре T_m ; m – масса разлитого слитка, кг; $Q(\tau_{охл})$ – теплосодержание слитка, кДж, в конце процесса охлаждения в изложнице, на воздухе и термостате, т.е. в момент загрузки в изложницу.

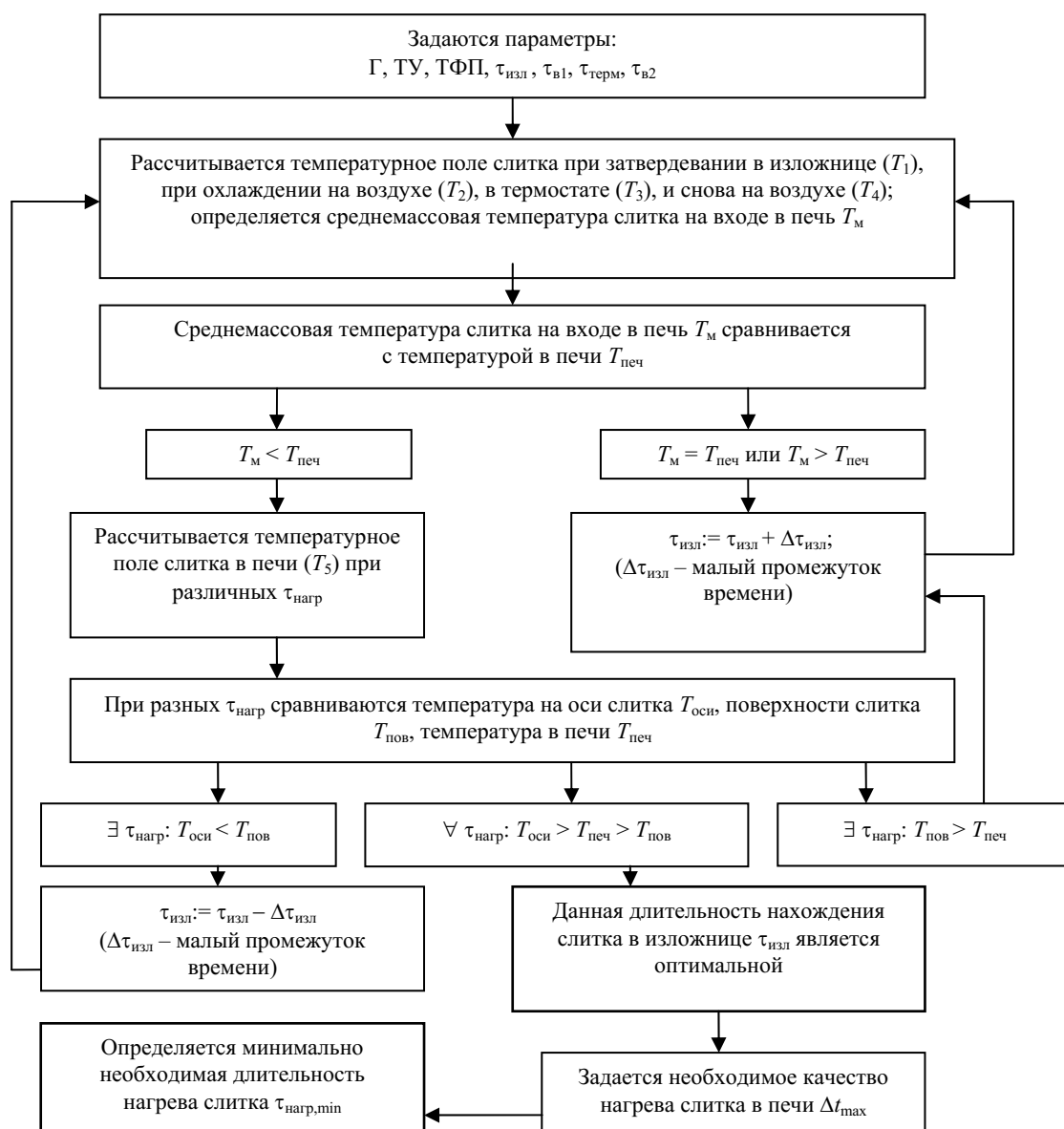


Рис. 3. Алгоритм определения оптимальной длительности $\tau_{изл, опт}$ и минимально необходимого $\tau_{нагр, min}$

Если температура T_m больше температуры в печи $T_{печ}$, то в печи нужно отвести лишнюю теплоту от слитка. Но так как температура поверхности слитка $T_{пов}$ при поступлении в печь меньше температуры в печи $T_{печ}$, то сначала слиток будет получать теплоту из рабочего пространства печи, и среднемассовая температура слитка станет еще больше. Лишь спустя какое-то время после помещения слитка в печь температура поверхности слитка превысит температуру в печи, и слиток начнет отдавать излишнюю теплоту в рабочее пространство. Данный режим не является оптимальным, так как происходит затягивание процесса выравнивания температурного поля слитка в печи. В этом случае, чтобы приблизить режим к оптимальному, нужно увеличить время выдержки слитка в изложнице $\tau_{изл}$.

Если среднемассовая температура T_m на входе в печь меньше температуры в печи $T_{печ}$, то для разных времен нагрева $\tau_{нагр}$ рассчитывается температурное поле слитка. Если для каких-то значений $\tau_{нагр}$ температура поверхности превысит температуру в печи ($T_{пов} > T_{печ}$), это означает, что среднемассовая температура слитка превысила температуру в печи, и данный режим не является оптимальным. Чтобы приблизиться к оптимальному режиму, нужно увеличить $\tau_{изл}$.

Если для времен $\tau_{нагр}$ больших некоторого значения, температура на оси слитка $T_{оси}$ становится меньше температуры на поверхности $T_{пов}$, то такой режим также не является оптимальным, и нужно уменьшить продолжительность выдержки слитка в изложнице $\tau_{изл}$.

Если для всех $\tau_{нагр}$ температура на оси больше температуры в печи, а температура на поверхности

меньше температуры в печи ($T_{оси} > T_{печ} > T_{пов}$), то такой режим является оптимальным, и текущее значение $\tau_{изл}$ также является оптимальным ($\tau_{изл} = \tau_{изл, опт}$). При таком режиме быстрее всего достигается необходимое качество нагрева. По заданному качеству нагрева ΔT_{max} для оптимального режима определяется минимальная длительность нагрева слитка в печи $\tau_{нагр, min}$.

Отметим, что в оптимальном варианте подвод теплоты к слитку в печи является незначительным, так как по существу в печи происходит выравнивание температуры по сечению слитка. Например, за счет сокращения длительности нахождения в изложнице с $\tau_{изл} = 180$ мин. до оптимального значения $\tau_{изл, опт} = 85$ мин., при $\tau_{в1} = 5$ мин., $\tau_{терм} = 30$ мин., $\tau_{в2} = 5$ мин., длительность нагрева слитка Р-4,5 (сталь 08Х18Н10Т) в печи, необходимая для качества нагрева $\Delta T_{max} = 30$ °С, сокращается с $\tau_{нагр} = 175$ мин. до минимального значения $\tau_{нагр, min} = 60$ мин., т.е. в три раза. Соответственно, в три раза возрастает производительность печи, значительно сокращаются удельный расход топлива и потери металла от окисления в печи.

Литература

1. Лукин, С.В. Математическая модель охлаждения слитка в термостате / С.В. Лукин, В.В. Мухин, Н.И. Шестаков, Ю.В. Антонова // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2013. – № 3. – Т. 2. – С. 28 – 30.
2. Лукин, С.В. Энергосбережение в нагревательных печах за счет оптимизации режимов разлива, охлаждения и нагрева стальных слитков / С.В. Лукин, Н.И. Шестаков, Ю.В. Антонова // Промышленная энергетика. – 2013. – № 10. – С. 26 – 30.

Н.С. Маконкова, Р.Ш. Адигамов, Е.А. Нечаева

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Своевременное обследование позволяет значительно продлить срок службы зданий и предупредить возникновение аварийных ситуаций. Обследование делится на визуальное и инструментальное. На втором этапе применяется электронное и лазерное геодезическое оборудование, которое позволяет получить более точные результаты по сравнению с измерениями, выполненными оптическими инструментами.

Деформация, крен, сдвиг, осадки, теодолит, нивелир, тахеометр, деформация, дефект, трещина, кирпичная кладка.

Contemporary survey can greatly extend the life of buildings and prevent them from accident situations. The survey is divided into visual and instrumental. Electronic and laser geodesic equipment applied in the second stage provides more accurate results compared with measurements made by optical instruments.

Deformation, rolling, shear, fallout, theodolite, level, tachymeter, warping, defect, crack, brickwork.

Обследование технического состояния отдельных строительных конструкций и зданий в целом является самостоятельным направлением строительной деятельности. Его цель – обеспечение в зданиях нормальных условий труда и жизнедеятельности

людей, а также устойчивости, прочности и надежности постройки в целом.

Развитие нормативной базы проектирования, технических и противопожарных норм эксплуатации требуют систематического анализа данных об экс-