

Андреев С.М.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ МЕТОДИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Прогнозирование времени нагрева слябовой заготовки в методической печи перед прокаткой позволяет произвести формирование оптимальной энергосберегающей траектории нагрева каждой заготовки на момент загрузки в нагревательную печь. Эффективность энергосберегающего режима нагрева заготовки зависит от точности прогнозирования времени нагрева заготовки, что в условиях переменной производительности прокатного стана становится особенно актуальным. В условиях нестационарной работы прокатного стана и нагревательной печи рассматриваемый метод предусматривает коррекцию общего времени нагрева не только с учетом плановых остановок стана, но и непредсказуемых аварийных и скрытых простоев стана в пределах прогнозируемого времени нахождения заготовки в печи. В работе рассмотрено теоретическое обоснование и приведены результаты практической проверки предлагаемого метода прогнозирования и коррекции общего времени нагрева каждой заготовки. Реализация и опытная проверка метода показала, что отклонение прогнозируемого общего времени нагрева от действительного значения в диапазоне  $\pm 4$  мин составило 90,4% при изменении общего времени нагрева от 140 до 195 мин при объеме выборки 457 заготовок.

**Ключевые слова:** время нагрева заготовок, нагрев заготовок перед прокаткой, управление нагревом, управление перемещением заготовок, методическая печь, слежение за заготовками, прокатный стан, горячая прокатка полос.

#### ВВЕДЕНИЕ

Своевременная подача нагретых до заданного температурного состояния заготовок к прокатным клетям стана горячей прокатки является приоритетной задачей энергосберегающей системы автоматизированного управления тепловым режимом нагревательных печей [1].

Формирование оптимальной энергосберегающей траектории нагрева заготовки производится в момент её загрузки в нагревательную печь. Расчетная траектория нагрева заготовки является одним из параметров общей настройки листопрокатного комплекса «печи – стан» и её формирование зависит от ритмичности работы всего оборудования стана [2-6].

В условиях нестационарного режима работы прокатного стана, когда производительность стана изменяется от 200 до 1000 т/ч, а в печах одновременно нагревается несколько партий заготовок, различающихся по маркам стали, с различной начальной температурой от 20 до 700°C, реализация энергосберегающего режима нагрева не должна быть фактором повышенного риска выдачи на стан недогретых заготовок и возникновения связанных с этим негативных последствий [7].

При реализации энергосберегающего графика нагрева возможна выдача на стан недогретой заготовки. Это возможно в случае, если фактическое время нагрева выдаваемой заготовки составило меньшую величину, чем прогнозируемое время нагрева, значение которого использовалось при расчете энергосберегающей температурной траектории (изменения контролируемого температурного параметра – обычно температуры по длине рабочего пространства печи) для данной заготовки [8].

Соблюдение выполнения технологический условий нагрева металла при реализации энергосберегающего режима управления нагревом обуславливает главную приоритетность наличия достоверного и опе-

ративного (на текущий момент подачи очередной заготовки в печь) прогноза продолжительности времени нагрева и скорости продвижения этой заготовки по длине рабочего пространства нагревательной печи.

Выполнение расчета оптимальной траектории нагрева заготовки по критерию энергоэффективности производится на известном интервале времени, а вид этой траектории зависит от величины резерва времени на нагрев [9].

Как правило, для решения задачи по определению оптимальной траектории нагрева ставится и решается задача оптимального управления с использованием принципа максимума Л.С. Понтрягина или метода динамического программирования [10]. Постановка и решение задачи также должно обеспечивать учет динамики передачи тепла от греющей среды к поверхности нагреваемой заготовки [11, 12].

#### СПОСОБЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБЩЕГО ВРЕМЕНИ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК

Существующие способы прогнозирования времени нагрева и темпа прокатки основаны на принципах последовательного измерения и сглаживания временных интервалов работы толкателей или извлекателей заготовок. Такой подход определения текущей производительности нагревательной печи проходного типа дает достаточно точные результаты и вполне приемлем в стационарных или близких к ним условиях [13]. Однако вследствие разнородного посада при изменении размеров заготовок от 1,5 до 16 мм возможно значительное изменение темпа прокатки, и в этом случае прогнозируемое время нагрева может значительно отличаться от действительного.

Наиболее точным методом определения времени нагрева заготовок является способ, основанный на расчете максимальной производительности стана при прокатке в целом для всех нагреваемых заготовок в печах с учетом плановых заготовок [14, 15].

Для определения максимально возможной производительности всего технологического комплекса рассматриваются минимально возможные интервалы времени: время прокатки каждой полосы в чистовой группе клетей, время смотки полосы в рулон на участке моталок, время между выдачей очередных заготовок на участке нагревательных печей. Максимальное время из полученных минимальных значений и будет определять прогнозируемый максимальный темп работы всего технологического комплекса для каждой конкретной заготовки, нагреваемой в печах перед загружаемой в печь. Как правило, это время соответствует времени прокатки полосы в чистовой группе клетей стана.

При непрерывной работе стана прогнозируемое время нагрева  $T_H^P(i)$  для каждой загружаемой заготовки определяется как сумма времени прокатки в чистовой группе клетей стана всех заготовок, которые планируется выдать из нагревательной печи в прокатку перед этой заготовкой, т.е. время нагрева можно определить

$$T_H^P(i) = \sum_{i=1}^{q-1} \tau_{BC}(i), \quad (1)$$

где  $q$  – число слябовых заготовок, нагреваемых в печах стана;  $\tau_{BC}(i)$  – время прокатки  $i$ -го сляба в чистовой группе клетей стана.

При таком способе прогнозирования времени нагрева  $T_H^P(i)$  учитываются и продолжительности всех текущих плановых остановок стана на перевалку и ремонт в соответствии с выражением

$$T_H^P(i) = \sum_{i=1}^{q-1} \tau_{BC}(i) + \sum_{p=1}^G \tau_p^{SP}(i), \quad (2)$$

где  $G$  – число плановых остановок стана за прогнозируемое время нагрева  $i$ -й заготовки;  $p$  – номер плановой остановки;  $\tau_p^{SP}(i)$  – продолжительность плановой остановки при нагреве  $i$ -го сляба.

После выдачи из печи очередной нагреваемой заготовки остальные должны переместиться на расстояние, занимаемое этой заготовкой. Путь  $S_i$ , пройденный заготовками в печи за время прокатки одной заготовки с учетом числа рядов заготовок во всех работающих печах  $K_F$ , составит

$$S_i = \frac{(B_i + r)}{K_F}. \quad (3)$$

Скорость перемещения заготовок в нагревательной печи соответственно будет равна

$$v(i) = \frac{(B_i + r)}{K_F \cdot \tau_{BC}(i)}. \quad (4)$$

Функция (4) представляет собой ломанную линию, каждый участок которой будет определяться сортаментом нагреваемого металла. Число участков равно количеству партий, одновременно находящихся в печи, а их длина будет зависеть от количества одинаковых заготовок в каждой партии металла.

При фиксированной длине каждой отапливаемой

зоны  $L_{F,M}$  можно рассчитать прогнозируемое время  $\tau_{i,M}$  пребывания каждой заготовки в этой зоне.

$$\tau_{i,M} = \frac{L_{F,M}}{v(i)}, \quad M \in (1;10), \quad (5)$$

где  $M$  – номер отапливаемой зоны в 10-ти зонной методической печи.

Метод расчета  $T_H^P(i)$  в соответствии с (2) позволяет достаточно точно определить искомую величину при отсутствии случайных аварийных простоев стана и постоянной величине коэффициента использования стана.

АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ ПРОГНОЗИРУЕМОГО ЗНАЧЕНИЯ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА ЗАГОТОВКИ

Коэффициент использования стана  $K_{RM}$  количественно характеризует величину скрытых простоев стана и в реальных условиях изменяется в диапазоне 0,87–0,95. Косвенным показателем наличия скрытых простоев, вызванных неритмичной работой стана, может служить частотное распределение времени пауз между прокаткой очередных полос. Исследования, проведенные на стане 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», показали, что при регламентированной продолжительности паузы, равной 5 с, принятой в прогнозирующих расчетах, действительное значение этого параметра представлено частотным распределением (рис. 1).

Наличие непрогнозируемых аварийных простоев стана, вызванных непредсказуемой случайной поломкой технологического оборудования или отказом системы управления станом, является наиболее значимым источником ошибки при прогнозировании общего времени нагрева заготовки.

Поэтому для повышения точности прогноза времени нагрева заготовки в момент её погрузки в нагревательную печь предлагается через определённый выбранный интервал времени  $\Delta\tau_5 = 10-15$  мин корректировать прогнозируемое время нагрева путем учета текущего значения  $K_{RM}$  и продолжительности текущего аварийного простоя.

Блок-схема предложенного алгоритма прогнозирования времени нагрева заготовок на момент погрузки и коррекции прогнозируемого времени нагрева  $T_H^P(i)$  представлена на рис. 2.

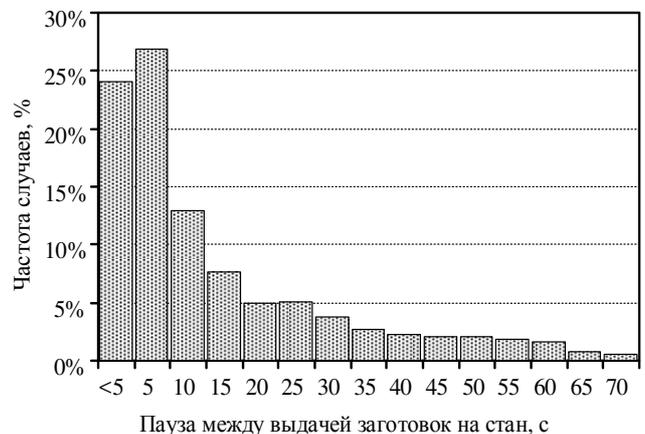


Рис. 1. Время паузы между выдачей заготовок на стан с участка нагрева

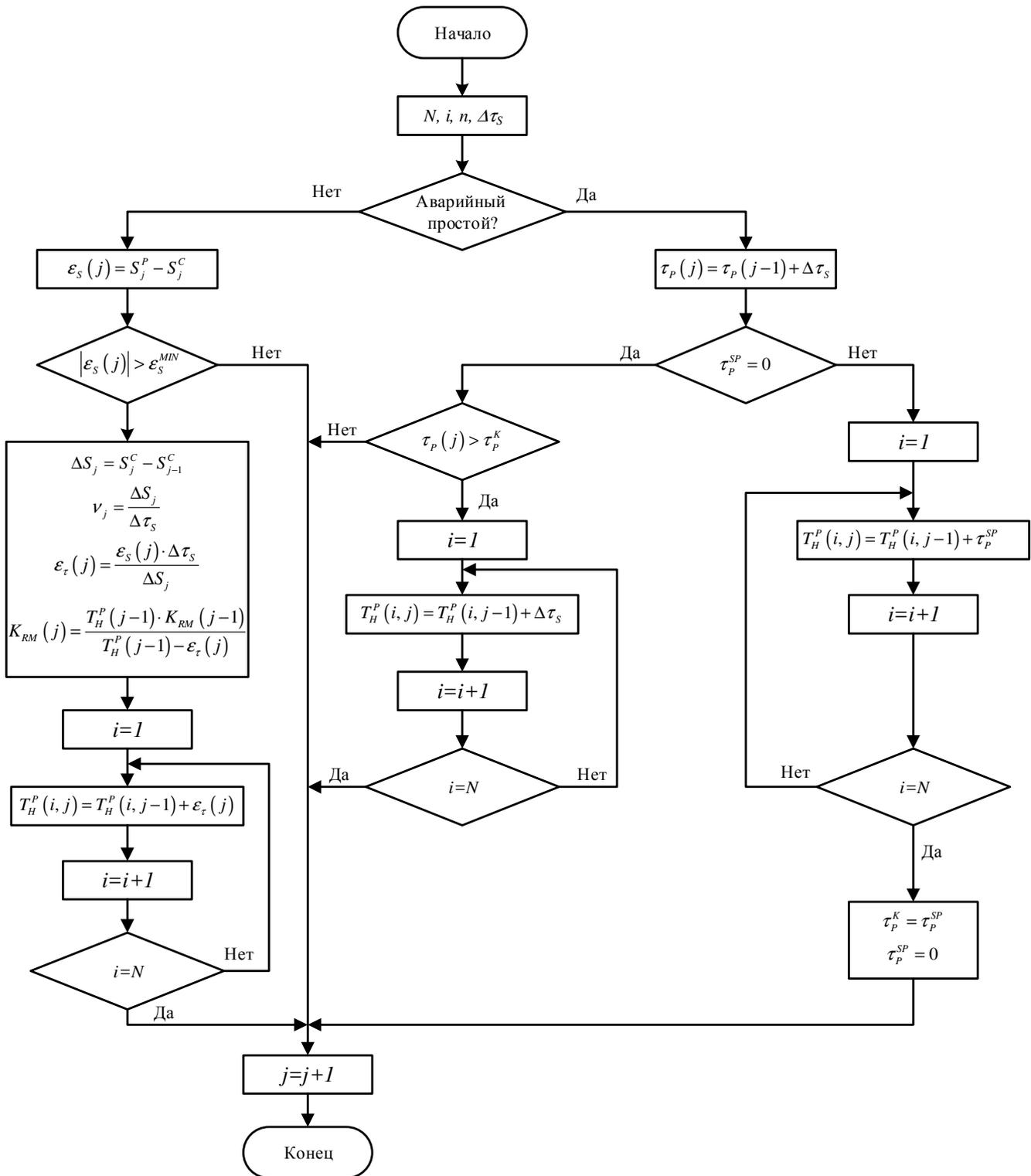


Рис. 2. Блок-схема алгоритма прогнозирования времени нагрева заготовок в проходной нагревательной печи с коррекцией по аварийным простоям и переменной производительности стана

Левая по схеме рис. 2 часть алгоритм обеспечивает коррекцию  $T_H^p(i)$  за счет слежения за текущим значением  $K_{RM}$  следующим образом. Периодически контролируется рассогласование между текущим положением заготовки  $S_j^c$  по длине печи и прогнозируемым положением  $S_j^p$  на  $j$ -м шаге коррекции путем вычисления ошибки прогноза положения заготовки  $\varepsilon_s(j)$ .

$$\varepsilon_s(j) = S_j^p - S_j^c. \quad (6)$$

Если полученная ошибка  $\varepsilon_s(j)$  лежит в зоне допустимой погрешности  $\varepsilon_s^{MIN}$ , равной длине одного шага подвижных балок 450 мм, то коррекция  $T_H^p(i)$  на  $j$ -м шаге не производится. Если  $|\varepsilon_s(j)| > \varepsilon_s^{MIN}$ , то вычисляемый путь  $\Delta S_j$ , пройденный заготовкой за время  $\Delta \tau_s$ , равное интервалу времени между двумя циклами коррекции, определяется в соответствии с выражением

$$\Delta S_j = S_j^c - S_{(j-1)}^c, \quad (7)$$

где  $S_{j-1}^C$  – положение заготовки на предыдущем цикле коррекции.

Затем определяется средняя скорость перемещения заготовки  $v_j$  за время  $\Delta\tau_S$

$$v_j = \frac{\Delta S_j}{\Delta\tau_S}, \text{ при } \Delta\tau_S = \text{const.} \quad (8)$$

Коррекция общего времени нагрева  $T_H^P(i)$  на  $j$ -м шаге коррекции  $\varepsilon_\tau(j)$  определяется с учетом допущения, что расстояние равно  $\varepsilon_S(j)$ , заготовка проходит со средней скоростью  $v_j$ , т.е. коррекция времени определяется следующим образом:

$$\varepsilon_\tau(j) = \frac{\varepsilon_S(i)}{v_j} = \frac{\varepsilon_j \cdot \Delta\tau_S}{\Delta S_j}. \quad (9)$$

Величина прогнозируемого времени нагрева каждой  $i$ -й заготовки на  $j$ -м шаге коррекции величины  $T_H^P(i)$  будет равна

$$T_H^P(i, j) = T_H^P(i, j-1) \pm \varepsilon_\tau(j). \quad (10)$$

Величину коррекции прогнозируемого времени нагрева  $\varepsilon_\tau(j)$  для  $i$ -й заготовки на  $j$ -м шаге коррекции можно выразить через коэффициент использования стана  $K_{RM}$

$$\varepsilon_\tau(j) = T_H^P(i, j-1) \cdot \left( 1 - \frac{K_{RM}(j-1)}{K_{RM}(j)} \right), \quad (11)$$

где  $K_{RM}(j-1)$ ,  $K_{RM}(j)$  – соответственно коэффициенты использования стана на предыдущем и текущем шаге коррекции.

Правая по схеме (см. рис. 2) часть алгоритма коррекции  $T_H^P(i)$  учитывает случайные и аварийные простои. Коррекция прогнозируемого времени осуществляется двумя способами. Первый способ обеспечивает коррекцию  $T_H^P(i)$  в случае, когда время аварийного простоя известно и задается в виде  $\tau_P^{SP}$ . В этом случае прогнозируемое время для всех заготовок на  $j$ -м шаге коррекции определится в соответствии с выражением

$$T_H^P(i, j) = T_H^P(i, j-1) + \tau_P^{SP}. \quad (12)$$

Второй вариант коррекции времени нагрева используется, если время аварийного простоя неизвестно, т.е.  $\tau_P^{SP} = 0$ . В этом случае прогнозируемое время нагрева для всех заготовок автоматически на каждом шаге коррекции увеличивается на  $\Delta\tau_S$

$$T_H^P(i, j) = T_H^P(i, j-1) + \Delta\tau_S. \quad (13)$$

Одновременно определяется общее время аварийного простоя стана в соответствии с выражением

$$\tau_P(j) = \tau_P(j-1) + \Delta\tau_S, \quad (14)$$

где  $\tau_P(j)$ ,  $\tau_P(j-1)$  соответственно текущее время аварийного простоя и время простоя на предыдущем шаге (цикле) коррекции.

В последующих циклах коррекции осуществляется контроль соответствия текущего времени аварийного

простоя  $\tau_P(j)$  и заданной продолжительности аварийного простоя  $\tau_P^{SP}$ . Для этого осуществляется проверка условия, что прогнозируемое время нагрева было увеличено на заданное время аварийного простоя в предыдущем цикле коррекции и время коррекции ( $\tau_P^K = \tau_P^{SP}$ ) еще больше, чем время текущего простоя. Если  $\tau_P(j) > \tau_P^K$ , то дальнейшее увеличение прогнозируемого времени нагрева для всех заготовок будет происходить автоматически в каждом шаговом цикле коррекции на величину  $\Delta\tau_S$ .

Алгоритм коррекции прогнозируемого времени нагрева функционирует непрерывно и одновременно с алгоритмом предварительного прогнозирования общего времени нагрева с момента подачи заготовки в нагревательную печь до момента выдачи заготовки на стан.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АЛГОРИТМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА

С целью определения погрешности предложенного метода прогнозирования общего времени нагрева на момент загрузки заготовки в печь на стане 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» проведено специальное исследование по определению отклонения прогнозируемого времени нагрева  $T_H^P$  от действительного  $T_H^C$  (фактического) для 457 заготовок.

Значительная часть (55%) нагреваемых заготовок в анализируемый период работы стана попала под одну перевалку. Часть заготовок (45%) нагревалась в печах без остановок стана. Частотное распределение отклонений фактического времени нагрева от прогнозируемого  $\Delta T = T_H^C - T_H^P$  в процессе проведения экспериментального исследования представлено на рис. 3.

Практически все (97,4%) величины отклонений находятся в диапазоне  $\pm 12$  мин, т.е. в пределах принятого цикла коррекции. Из них 90,4% отклонений находятся в диапазоне  $\pm 4$  мин. Общая ошибка прогноза при изменении общего времени нагрева от 140 до 195 мин за период проведения эксперимента составила 2,5%. Такая точность прогноза на момент подачи заготовки в нагревательную печь вполне достижима для достоверного оперативного прогноза общего времени нагрева заготовки при расчете энергосберегающей температурной траектории нагрева для обеспечения гарантированного нагрева заготовок.

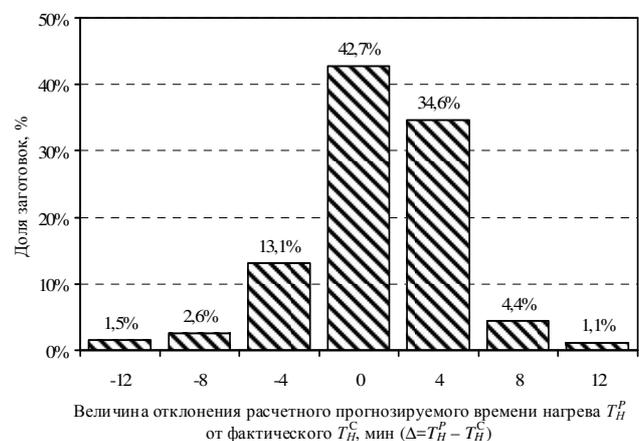


Рис. 3. Частотное распределение отклонений расчетного времени нагрева от фактического (для 457 заготовок)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод прогноза и коррекции времени нагрева заготовок на момент их загрузки в нагревательную печь обладает достаточной для практического применения точностью. Учет аварийных и скрытых простоев прокатного стана позволяет оперативно корректировать прогнозируемое время нагрева и соответственно производить коррекцию траектории нагрева заготовок. Прогнозирование времени нагрева позволяет решить проблему расчета энергосберегающего управления нагревом заготовок перед прокаткой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев С.М., Парсункин Б.Н., Ахметов У.Б. Разработка и исследование работы системы энергосберегающего управления нагревом заготовок в методических печах листопрокатных станов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1. С. 122–128
2. Генкин А.Л., Куделин А.Р. Проблемы энергосберегающего управления листопрокатным комплексом. Ч.1. // Проблемы управления. 2006. № 6. С. 50–54.
3. Управление технологическим комплексом «ПЕЧЬ-СТАН» при горячей прокатке стальных полос / Р.Л. Шаталов, А.Л. Генкин, Т.А. Койнов, Е.Ю. Верхов, С.А. Бражников // Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология: труды VII международной научно-практической конференции; Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС». М., 2014. С. 449–457.
4. Шаталов Р.Л., Генкин А.Л. Энергосберегающее управление как фактор интенсификации производства горячекатаных стальных полос // Научно-технический прогресс в чёрной металлургии / I Международная научно-техническая конференция, Череповец, 2013. С. 406–412.
5. Генкин А.Л. Энергосберегающее управление листопрокатным комплексом «Печи-Стан» // Сталь. 2011. № 3. С. 34–40.
6. Генкин А. Л. Энергосберегающее управление современным листопрокатным производством // Производство проката. 2008. № 7. С. 38–43.
7. Маковский В.А., Лаврентик Н.Н. Алгоритм управления нагревательными печами. М.: Металлургиздат, 1977. 184 с.
8. Автоматизированная система управления топливосберегающим несимметричным нагревом непрерывнолитых заготовок перед прокаткой / Андреев С.М., Ахметов Т.У., Нужин Д.В., Парсункин Б.Н. // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №3(32). С. 60–65.
9. Оптимальные топливосберегающие режимы нагрева непрерывнолитых заготовок в методических печах / Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Жадинский Д.Ю., Ахметова А.У. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 89–96.
10. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1983. 393 с.
11. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S., Akhmetov, T.U. Energy-saving optimal control over heating of continuous cast billets // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer London, vol. 79, iss. 9–12, 2015, pp. 1797–1803.
12. Lee D. E., Kim M. Y. Optimum residence time for steel productivity and energy saving in a hot rolled reheating furnace // Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 27, iss. 9, pp. 2869–2877.
13. Автоматизация методических печей / Л.И. Буглак, И.Б. Вольфман, С.Ю. Ефроймович, Г.К. Захаров, М.Д. Климовицкий, А.М. Сегаль. М.: Металлургия, 1981. 196 с.
14. Зуев Е.С., Парсункин Б.Н., Фомичев А.В. Прогнозирование времени прокатки слябов на широкополосном стане горячей прокатки // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2011. №1–1. С. 119–125.
15. Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Оптимизация режимов управления нагревом в печах проходного типа: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 375 с.

Поступила в редакцию 31 июля 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

CONTINUOUS-CAST BILLET HEATING TIME FORECAST IN THE CONTEXT OF NON-STATIONARY RUN OF A CONTINUOUS FURNACE

Sergey M. Andreev

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The forecasting of slab billet heating time in a continuous furnace before rolling enables forming of an optimal power saving heating path of each billet at the moment of its charge into the furnace. The optimal heating mode efficiency depends on the accuracy of the slab heating time forecasting, which is especially urgent amidst rolling mill variable performance. In the context of non-stationary run of a rolling mill and continuous furnace, the involved method provides for the improvement of the heating time not only subject to mill planned shutdown but also taking into account unpredictable emergency and undetected standing time within forecasting billet occurrence in the furnace. The paper gives theoretical and experimental justification of the suggested method of forecasting and improvement of each slab total heating time. Implementation and experimental check of the method revealed that the deviation of the total forecast heating time in the 4 min range is 90.4 % with the variation of the total heating time from 140 to 195 min and 457 slab sample volume.

**Keywords:** Continuous-cast heating time, slab billet heating

before rolling, heating control, billet movement control, continuous furnace, slab billet detection, rolling mill, hot rolling.

REFERENCES

1. Andreev S.M., Parsunkin B.N., Akhmetov U.B. Development and research of the system of energy-saving control of billet heating in methodical furnaces of sheet rolling mills. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 1, pp. 122–128. (In Russian)
2. Genkin A.L., Kudelin A.R. Problems of Energy-saving Control of Sheet Mill. Part 1. *Problemy upravleniya* [Control sciences], 2006, no.6, pp. 50–54. (In Russian)
3. Shatalov R.L., Genkin A.L., Kojnov T.A., Verhov E.Ju., Brazhnikov S.A. The technological complex control "FURNACES-STAN" in the hot rolling of steel strips. *Jenergoberegajushhie tehnologii v promyshlennosti. Pechnye agregaty. Jekologija Trudy VII mezhdunarodnoj*

- nauchno-prakticheskoy konferencii. Nacional'nyj issledovatel'skij tehnologicheskij universitet «MISIS».* [Energy-saving technologies in industry. Oven aggregates. Ecology Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference. National Research Technological University "MISIS"], Moscow, 2014, pp. 440–457. (In Russian)
4. Shatalov R.L., Genkin A.L. Energy-saving control as a factor of intensification of production of hot-rolled steel strips. *Nauchno-tehnicheskij progress v chjornoj metallurgii . I Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija.* [Scientific and technical progress in ferrous metallurgy. I International scientific and technical conference.], Cherepovets, 2013, pp. 406–412. (In Russian)
  5. Genkin A.L. Energy-efficient control of the sheet-rolling complex "Furnaces-Rolling Mill". *Stal* [Steel], 2011, no. 3, pp. 34–40. (In Russian)
  6. Genkin A.L. Energy-saving control of modern sheet rolling production. *Proizvodstvo Prokata* [Rolled Products Manufacturing], 2008, no. 7, pp. 38–43. (In Russian)
  7. Makovskiy V.A., Lavrentik N.N. *Algoritm upravleniya nagrevatel'nymi pechami* [The control algorithm heating furnaces], Moscow, Metallurgizdat, 1977. 184 p.
  8. Andreev S.M., Akhmetov T.U., Nuzhin D.V., Parsunkin B.N. Automated control system of fuel saving in asymmetric heating of continuous cast billets before rolling. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2016, no. 3(32), pp. 60–65. (In Russian)
  9. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Zhadinsky D.Yu., Akhmetova A.U. Optimal fuel-efficient modes of heating continuously cast billets in continuous reheating furnaces. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 89–96. (In Russian)
  10. Pontryagin L.S., Boltyanskiy V.G., Gapkrelidze R.V. *Matematicheskaya teoriya optimalnykh protsessov* [The mathematical theory of optimal processes]. Moscow, Nauka, 1969, 393 p.
  11. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S., Akhmetov T.U. Energy-saving optimal control over heating of continuous cast billets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer London, vol. 79, iss. 9–12, 2015, pp. 1797–1803
  12. Lee D.E., Kim M.Y. Optimum residence time for steel productivity and energy saving in a hot rolled reheating furnace. *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 27, iss. 9, pp. 2869–2877.
  13. Buglak L.I., Vol'fman I.B., Efrogmovich S.Ju., Zaharov G.K., Klimovickij M.D., Segal' A.M. *Avtomatizacija metodicheskikh pechej* [Automation of continuous furnaces]. Moscow, Metallurgija, 1981. 196 p.
  14. Zuev E.S., Parsunkin B.N., Fomichev A.V. Forecasting of rolling time of slabs on a wide-strip hot rolling mill. *Matematicheskoe i programnoe obespechenie sistem v promyshlennoy i sotsial'noy sferakh* [Software of system in the industrial and social fields], 2011, no. 1–1, pp. 119–125.
  15. Andreev S.M., Parsunkin B.N. *Optimizatsiya rezhimov upravleniya nagrevom v pechakh prokhodnogo tipa: monografiya* [Optimization of control modes heating furnaces transmission type], Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013. 375 p.

Андреев С.М. Прогнозирование времени нагрева заготовок в условиях нестационарного режима работы методических печей // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 3(36). С. 35–40. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-35-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-35-40)

Andreev S.M. Continuous-Cast Billet Heating Time Forecast In The Context Of Non-Stationary Run Of A Continuous Furnace. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 3(36), pp. 35–40. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-35-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-35-40)