

DOI 10.23859/1994-0637-2018-5-86-1

УДК 669-04

© Лукин С.В., Левашев К.Ю.,

Збродов А.А., Кибардин А.Н., Малыгин Л.Л., 2018

Лукин Сергей Владимирович

Доктор технических наук, профессор,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: s.v.luk@yandex.ru

Lukin Sergey Vladimirovich

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: s.v.luk@yandex.ru

Левашев Константин Юрьевич

Аспирант,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: djokl@mail.ru

Levashev Konstantin Yurievich

Postgraduate, Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: djokl@mail.ru

Збродов Алексей Александрович

Аспирант,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: zbrodov.a@mail.ru

Zbrodov Aleksey Aleksandrovich

Postgraduate, Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: zbrodov.a@mail.ru

Кибардин Антон Николаевич

Кандидат технических наук, менеджер,
ПАО «Северсталь»
(Череповец, Россия)
E-mail: anton_kibardin@mail.ru

Kibardin Anton Nikolayevich

PHD (Technical Sciences), Manager,
Public company "Severstal"
(Cherepovets, Russia)
E-mail: anton_kibardin@mail.ru

Малыгин Леонид Леонидович

Доктор технических наук, доцент,
президент ООО Малленом Системс
(Череповец, Россия)
E-mail: malygin@mallenom.ru

Malygin Leonid Leonidovich

Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor,
President of Company "Mallenom Systems"
(Cherepovets, Russia)
E-mail: malygin@mallenom.ru

**СИСТЕМНАЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ
МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ТЕПЛООВОГО
СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНОЙ
ЗАГОТОВКИ НА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ
«МНЛЗ – НАГРЕВАТЕЛЬНАЯ ПЕЧЬ»**

**SYSTEMIC AND FUNCTIONAL
MODELS OF EVALUATION OF
HEAT STATE OF STEEL BILLET
ON THE TECHNOLOGICAL LINE
“CONTINUOUS CASTING
MACHINE – HEATING STOVE”**

Аннотация. В статье рассмотрены системная и функциональная модели, на основе которых производится оценка теплового состояния стальной заготовки произвольного поперечного сечения при ее охлаждении в машине непрерывного литья заготовок, в термостате и нагр-

Abstract. In the paper the systemic and functional models used for the evaluation of the heat condition of steel billet with any cross section at cooling in continuous casting machine and in thermostat, and heating in heating stove are considered. Steel billets exit

вательной печи. Заготовки покидают машину непрерывного литья с высокой средней температурой, и для сохранения их физической теплоты и выравнивания температуры по сечению заготовки нужно помещать в термостаты, в которых они доставляются к нагревательным печам прокатного стана. При загрузке в печи горячих заготовок может быть получена значительная экономия топлива, затрачиваемого на нагрев металла до температуры, необходимой для прокатки.

from a continuous casting machine with high average temperature, and, for conserving their sensible heat and leveling temperature across their cross section, billets should be put into thermostats in which they are delivered to heating stoves of rolling mill. Loading hot steel billets in heating stoves can give significant economy of fuel spent on metal heating to temperature required for rolling.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, термостат, стальная заготовка, нагревательная печь

Keywords: continuous casting machine, thermostat, steel billet, heating stove

Введение

В работах [1]–[6] рассмотрены математические модели и алгоритмы, позволяющие определять оптимальные режимы охлаждения слабов и заготовок квадратного сечения в машинах непрерывного литья на воздухе и в термостате и их нагрева в нагревательных печах. Оптимизация данных режимов позволяет значительно сократить расход газообразного топлива (природного газа) в нагревательных печах прокатного производства, увеличить производительность печей и снизить потери металла от окисления в печах.

В данной работе рассмотрены системная и функциональная модели для оценки теплового состояния слабов, которые могут быть использованы для оптимизации тепловых режимов охлаждения и нагрева заготовок произвольного поперечного сечения.

Основная часть

Оценка теплового состояния стальных заготовок при их охлаждении, термостатировании и нагреве на линии «МНЛЗ – термостат – нагревательная печь» производится на основании следующих данных:

- температура T_0 жидкой стали, поступающей в кристаллизатор МНЛЗ;
- скорость вытягивания сляба в МНЛЗ (скорость разливки) v ;
- расходы охлаждающей воды, подаваемой на кристаллизатор $G_{кр}$, ролики $G_{ролj}$ и форсунки ЗВО МНЛЗ $G_{вj}$;
- нагрев воды в кристаллизаторе $\Delta T_{кр}$ и роликах $\Delta T_{ролj}$;
- температура воды, подаваемой из форсунок, $T_{вj}$;
- рабочие длины кристаллизатора и секций ЗВО МНЛЗ l_j ;
- температуры в рабочем пространстве методической печи $T_{пi}$;
- длины нагревательных зон печи $l_{пi}$;
- длительность охлаждения сляба в зоне воздушного охлаждения τ_0 ;
- длительность нахождения сляба в термостате τ_t ;
- длительности нагрева сляба в методической и сварочной зонах печи $\tau_{п1}, \tau_{п2}$;
- длительность выдержки сляба в томильной зоне печи $\tau_{тм}$.

Кроме того, для оценки теплового состояния сляба необходима информация о марке стали M и сечении разливаемого сляба $2A \times 2B$, которая поступает из системы управления производством. Из базы данных (БД) по маркам стали определяются теплофизические параметры стали (коэффициент теплопроводности λ , теплоемкость c , плотность ρ , теплота затвердевания L , температуры ликвидус и солидус t_l и t_c).

Для оптимизации режимов охлаждения, термостатирования, нагрева и томления слябов необходима информация о требуемой средней температуре металла и допустимом градиенте температур по сечению сляба перед загрузкой в нагревательную печь T_{m0} и ∇T_{m0} , необходимой средней температуре металла и допустимом градиенте температуры по сечению сляба перед прокаткой T_m , ∇T_m , которая берется из базы данных по маркам стали и сечениям слябов.

Обеспечение требуемого теплового состояния слябов при поступлении в печь (T_{m0} , ∇T_{m0}) позволяет стабилизировать тепловую работу. Обеспечение необходимого теплового состояния сляба при поступлении на прокатный стан (T_m , ∇T_m) дает возможность стабилизировать работу агрегата.

Оценка теплового состояния сляба производится с помощью математического моделирования с учетом полученных данных, которое позволяет определить температурное поле $T_{\text{пов}}(\tau)$, $T_{\text{оси}}(\tau)$ и среднемассовую энтальпию $h_{\text{ср}}(\tau)$ сляба в зависимости от времени нахождения в МНЛЗ, термостате и нагревательной печи τ . Кроме того, определяется максимальный градиент температур по сечению сляба $\nabla T_{\text{max}}(\tau)$.

Тепловое состояние сляба на входе в печь (T_{m0} , ∇T_{m0}) зависит от параметров стали, разливаемой в МНЛЗ, геометрических параметров МНЛЗ и сляба, скорости разлива в МНЛЗ, параметров и длительности охлаждения в кристаллизаторе и ЗВО МНЛЗ, условий и длительности охлаждения на воздухе и термостатирования. Тепловое состояние сляба на выходе из печи (T_m , ∇T_m) зависит от теплового состояния на входе в печь (T_{m0} , ∇T_{m0}), температуры в рабочем пространстве печи, условий, длительности нагрева и томления.

Системная модель оценки теплового состояния слябов на линии «МНЛЗ – термостат – нагревательная печь» показана на рис. 1. Данная модель имеет 4 уровня: уровень технологии, 1-й и 2-й уровни автоматизации, уровень планового управления. На уровне технологии находится МНЛЗ, в которую поступает жидкая сталь, термостат, в который загружается сляб после газорезки, нагревательная печь проходного типа с зонами нагрева и томления, в которую поступает сляб, извлеченный из термостата.

В первый уровень автоматизации входят датчики температуры жидкой стали T_0 ; скорости разлива v , расходов охлаждающей воды на кристаллизатор $G_{\text{кр}}$, на ролики $G_{\text{ролж}}$, на форсунки ЗВО МНЛЗ $G_{\text{вж}}$; нагрева воды в кристаллизаторе $\Delta T_{\text{кр}}$ и роликах $\Delta T_{\text{ролж}}$; температур в рабочем пространстве методической печи $T_{\text{пж}}$. Кроме того, на этом уровне имеются таймеры, регистрирующие длительности нахождения сляба в зоне охлаждения на воздухе τ_0 , в термостате τ_t , в нагревательных зонах печи $\tau_{\text{н1}}$ и $\tau_{\text{н2}}$, в томильной зоне печи $\tau_{\text{тм}}$. В определенные моменты времени могут регистрироваться температуры поверхности сляба $T_{\text{повж}}$ МНЛЗ, в термостате, в нагревательной печи. Значения данных температур могут быть использованы при проверке адекватности расчетных программ. По ним можно приближенно оценивать тепловое со-

стояние сляба. Так, при достаточно длительной выдержке сляба в термостате происходит выравнивание температуры по сечению, и температура поверхности сляба приближается к среднемассовой температуре.

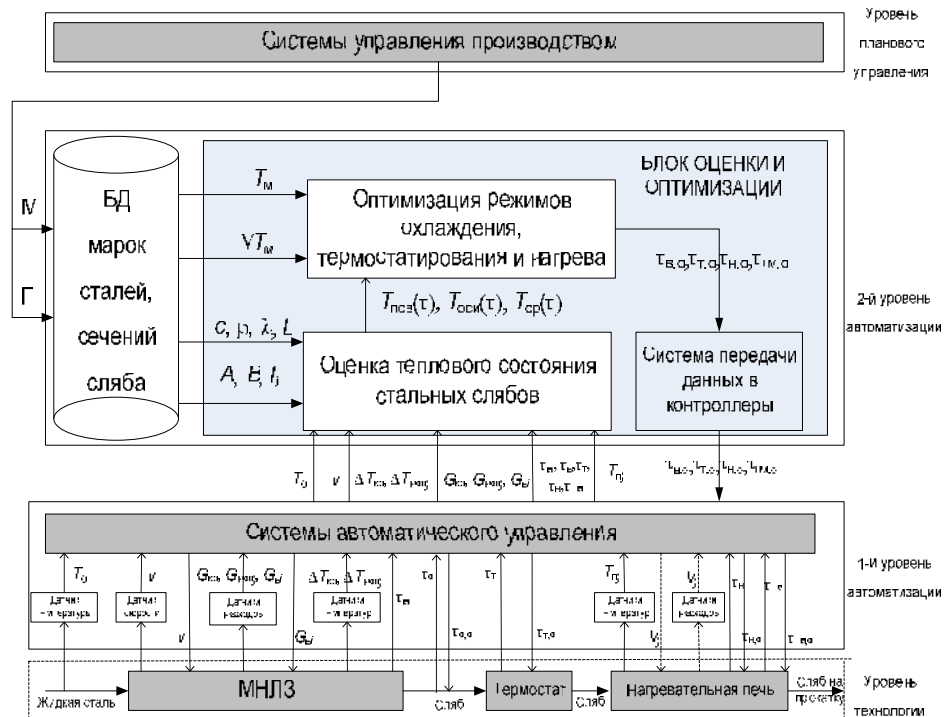


Рис. 1. Системная модель оценки теплового состояния слябов на линии «МНЛЗ – нагревательная печь»

Значения параметров $T_0, v, G_{кр}, G_{рол}, G_{в}, \Delta T_{кр}, \Delta T_{рол}, T_{п}, \tau_o, \tau_t, \tau_{н1}$ и $\tau_{н2}, \tau_{тм}, T_{пов}$ передаются на второй уровень автоматизации в базу данных рецептов, куда также из системы управления производством передаются данные о разливаемой марке стали (M) и сечении сляба, характеризуемом шириной $2A$ и толщиной $2B$, о длине кристаллизатора и зон ЗВО МНЛЗ l_i . Из базы данных марок сталей определяются теплофизические свойства разливаемой марки стали: коэффициент теплопроводности λ , плотность ρ , массовая теплоемкость c (в зависимости от температуры), а также теплота затвердевания жидкой стали L , температуры ликвидус t_l и солидус t_c . Для данной марки стали задается требуемое тепловое состояние сляба перед загрузкой в печь ($T_{M0}, \nabla T_{M0}$) и необходимое тепловое состояние сляба перед прокаткой ($T_M, \nabla T_M$).

Параметры $2A, 2B, l_i, \lambda, \rho, c, L, t_l, t_c, T_0, v, G_{кр}, G_{рол}, G_{в}, \Delta T_{кр}, \Delta T_{рол}, T_{п}, \tau_o, \tau_t, \tau_{н1}$ и $\tau_{н2}, \tau_{тм}$ поступают в имитационную модель, описывающую процессы затвердевания, охлаждения, термостатирования и нагрева сляба, которая рассчитывает температурное поле.

Скорость разливки v , расходы воды на кристаллизатор, ролики и форсунки $G_{кр}, G_{рол}, G_{в}$, длительность охлаждения и затвердевания сляба τ_m в кристаллизаторе и

ЗВО МНЛЗ определяются технологией непрерывной разливки. Длительности охлаждения сляба на воздухе τ_o , нахождения в термостате τ_t , нагрева в печи τ_n и томления (термостатирования) τ_{tm} являются управляющими параметрами.

Оптимизацию процессов охлаждения, термостатирования, нагрева и томления сляба целесообразно разделить на два этапа оптимизации процессов:

- 1) охлаждения и термостатирования сляба после МНЛЗ, когда из термостата выходит сляб с требуемым для прокатки тепловым состоянием;
- 2) нагрева и томления сляба, когда из томильной зоны печи выходит сляб с требуемым для прокатки тепловым состоянием.

В первом случае параметрами, подлежащими оптимизации, являются длительности:

- охлаждения сляба в зоне воздушного охлаждения τ_o ;
- нахождения сляба в термостате τ_t .

Оптимизация процессов охлаждения и термостатирования сляба после МНЛЗ заключается в том, что при заданных скорости разливки v и расходах охлаждающей воды определяются длительности охлаждения сляба на воздухе $\tau_{o,o}$ и нахождения в термостате $\tau_{t,o}$. В момент извлечения из термостата обеспечивается необходимое для загрузки в печь тепловое состояние сляба (T_{m0} , ∇T_{m0}). Если $T_{m0} = T_m$, а $\nabla T_{m0} = \nabla T_m$, то нагрев сляба в методической печи становится ненужным, а удельный расход топлива в печи равняется нулю (идеальный вариант).

Во втором случае оптимизируемыми параметрами являются длительности:

- нагрева в методической и сварочной зонах печи τ_n ;
- томления (или термостатирования) сляба после нагрева τ_{tm} .

Оптимизация процесса нагрева сляба в методической печи заключается в том, что при известном тепловом состоянии сляба на входе в печь и заданной температуре в рабочем пространстве печи контролируются длительности нагрева $\tau_{n,o}$ и выдержки сляба в томильной зоне $\tau_{tm,o}$, обеспечивающих необходимое его тепловое состояние на выходе из печи (T_m , ∇T_m). При этом сохраняется требуемая пластичность металла при обработке давлением в процессе прокатки.

На рис. 2 приведена функциональная модель системы оценки параметров теплового состояния сляба на линии «МНЛЗ – нагревательная печь». В данной функциональной модели в блоке 1 «Восстановление параметров теплообмена» по данным измерения температуры поверхности сляба в определенные моменты времени уточняются значения приведенных степеней черноты и коэффициентов излучения на следующих участках: зона воздушного охлаждения сляба в МНЛЗ, охлаждение сляба на воздухе, термостат, нагревательные зоны печи, томильная зона. Полученные значения используются в блоках 2, 5, 7 при численном расчете температурного поля сляба в МНЛЗ, термостате, нагревательной печи.

В блоке 2 «Расчет температурного поля сляба в МНЛЗ» входными данными являются: геометрические размеры сляба и секций МНЛЗ, скорость вытягивания сляба, расходы охлаждающей воды на форсунки ЗВО, температура жидкой стали, теплофизические свойства стали. Выходными данными данного блока являются показатели температурного поля сляба в МНЛЗ.

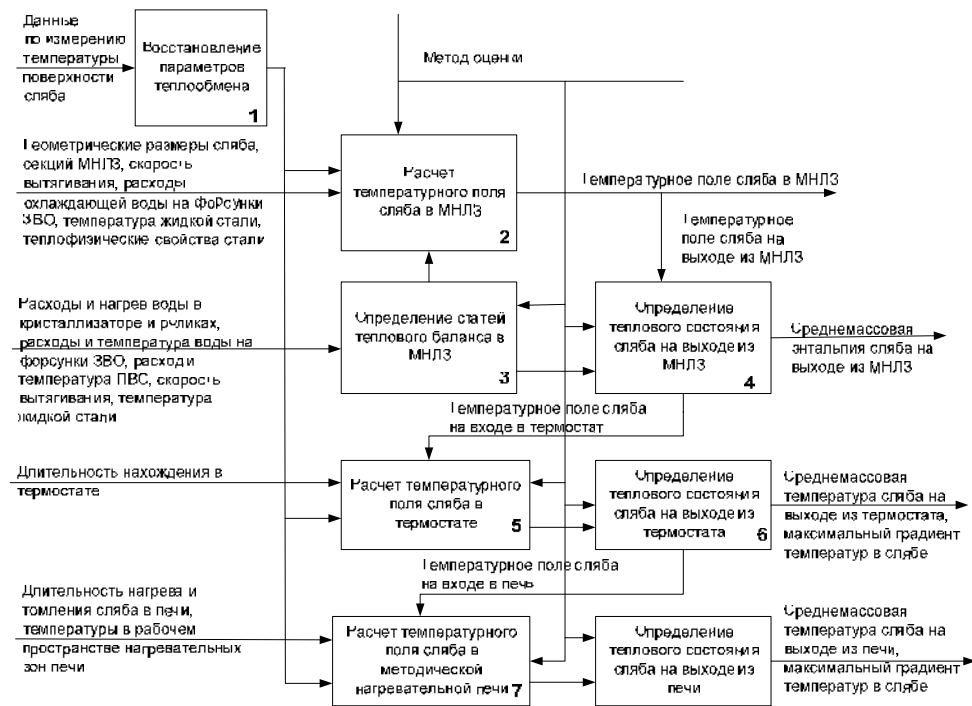


Рис. 2. Функциональная модель системы оценки теплового состояния слэба на линии «МНЛЗ – нагревательная печь»

В блоке 3 «Определение статей теплового баланса МНЛЗ» входными данными являются: расходы и нагрев воды в кристаллизаторе и роликах МНЛЗ, расходы и температура воды на форсунки ЗВО, расход и температура паровоздушной смеси, удаляемой из бункера ЗВО, скорость вытягивания слэба, температура жидкой стали, теплофизические свойства стали. Выходными данными являются: тепловые потоки, отводимые в кристаллизаторе и роликах паровоздушной смесью, неиспарившейся водой, слэбом, выходящим из МНЛЗ. Эти данные могут быть использованы в блоке 2 для уточнения условий теплообмена на поверхности слэба в кристаллизаторе и ЗВО.

Данные, полученные в блоках 2 и 3, являются входными для блока 4 «Определение теплового состояния слэба на выходе из МНЛЗ», где выходные показатели – температурное поле слэба и среднемассовая энтальпия слэба на выходе из МНЛЗ.

В блоке 5, где рассчитывается температурное поле слэба в термостате, входными данными являются: длительность нахождения слэба в термостате и температурное поле слэба на выходе из МНЛЗ (на входе в термостат). Данные, полученные в блоке 5, поступают в блок 6, где определяется тепловое состояние слэба на выходе из термостата. Выходные данные блока 6: температурное поле слэба на выходе из термостата, среднемассовая температура слэба и максимальный градиент по сечению слэба в момент выхода из термостата.

В блоке 7, где рассчитывается температурное поле сляба в методической нагревательной печи, входными данными являются: длительности нагрева и томления сляба в печи, температуры в рабочем пространстве нагревательных зон печи, выходные данные блока 6. Выходные данные, полученные в блоке 7, поступают в блок 8, где производится оценка теплового состояния сляба на выходе из нагревательной печи. Выходными данными блока 8 являются: температурное поле сляба на выходе сварочной и томильной зон печи, среднемассовая температура сляба и максимальный градиент по его сечению в момент выхода из сварочной и томильной зоны.

Рассмотренные системная и функциональная модели оценки теплового состояния стальных слябов и заготовок квадратного сечения были реализованы с помощью математических моделей и алгоритмов, представленных в [1]–[6].

В качестве примера рассмотрим оптимальный режим охлаждения и термостатирования сляба в МНЛЗ, основное требование к нему – среднемассовая температура T_m и допустимый градиент температур ∇T_m перед прокаткой.

На рис. 3 показано изменение температур на поверхности T_{Π} и в центре сляба T_{Π} при разливке сляба из углеродистой стали 20 толщиной 250 мм со скоростью 1,08 м/мин. при оптимальном использовании физической теплоты сляба после МНЛЗ. Чтобы получить на выходе из обогреваемого термостата (без потерь теплоты) среднемассовую температуру сляба $T_m = 1250$ °С, нужно, чтобы в момент $\tau = 23,8$ мин. сляб из зоны воздушного охлаждения сляба поступал в термостат, при этом время, проведенное слябом в зоне воздушного охлаждения, составит $\tau_{o, \text{опт}} \cong 7$ мин. После помещения сляба в термостат температура в центре сляба T_{Π} понижается, а температура на поверхности T_{Π} увеличивается, стремясь к значению $T_m = 1250$ °С. Градиенту температуры $\nabla T_m = 2$ К/см соответствует момент $\tau = 37,9$ мин. (рис. 3), при этом оптимальная длительность выдержки сляба в термостате составит $\tau_{\text{т.опт}} \cong 14,1$ мин.

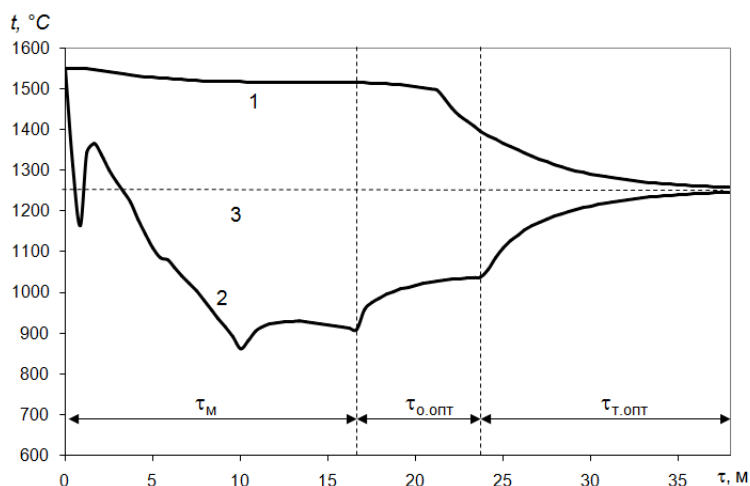


Рис. 3. Оптимальный режим охлаждения и термостатирования сляба в МНЛЗ;
1 – температура в центре сляба T_{Π} ; 2 – температура поверхности в центре широкой грани сляба T_{Π} ; 3 – требуемая температура металла перед прокаткой $T_m = 1250$ °С

Реализация на практике оптимального режима охлаждения и термостатирования сляба в МНЛЗ, показанного на рис. 3, позволит отказаться от нагрева сляба в нагревательной печи, при этом расход топлива на нагрев металла перед прокаткой будет равняться нулю.

Выводы

В статье на примере стальных слябовых заготовок разработаны системная и функциональная модели, необходимые для построения математических моделей и алгоритмов, используемых для оценки теплового состояния стальных заготовок произвольного поперечного сечения при ее охлаждении в машине непрерывного литья заготовок, в термостате, при нагреве в нагревательной печи, а также для оптимизации указанных тепловых режимов. Например, оптимизация охлаждения стальной заготовки на воздухе после МНЛЗ и в термостате позволяет получить необходимое для прокатки тепловое состояние заготовки, в этом случае отпадает необходимость в нагревательной печи. При этом экономия топлива на нагрев металла в печи будет максимальной, поскольку расход топлива в печи будет равным нулю. Если тепловое состояние заготовки на выходе из термостата не удовлетворяет условиям пластичности металла, то оптимизация нагрева и томления (или термостатирования) заготовок в печи также позволяет максимально увеличить производительность и снизить удельный расход топлива на нагрев металла. Кроме того, при этом существенно снижаются потери металла от окисления в рабочем пространстве печи.

Литература

1. Лукин С.В., Игонин В.И., Кочкин А.А., Кибардин А.Н., Мухин В.В., Антонова Ю.В. Оптимальные режимы охлаждения, термостатирования и нагрева слябов на линии «МНЛЗ – прокатный стан» // Вестник Череповецкого государственного университета. 2016. № 6 (75). С. 16–20.
2. Лукин С.В., Кибардин А.Н., Антонова Ю.В. Алгоритм оценки параметров теплового состояния сляба на линии «МНЛЗ – термостат – нагревательная печь» // Вестник Череповецкого государственного университета. 2017. № 5 (80). С. 25–36.
3. Лукин С.В., Кибардин А.Н., Сидоренкова С.Е., Кочкин А.А. Оптимизация режимов нагрева и термостатирования слябов при горячем посаде в нагревательные печи // Вестник Череповецкого государственного университета. 2016. № 3 (72). С. 7–11.
4. Лукин С.В., Кибардин А.Н. Оптимальное использование физической теплоты слябов после МНЛЗ // Металлург. 2016. № 7. С. 38–43.
5. Лукин С.В., Кочкин А.А., Кибардин А.Н., Антонова Ю.В., Мухин В.В., Игонин В.И. Алгоритмы оптимизации режимов охлаждения, термостатирования и нагрева слябов на линии «МНЛЗ – нагревательная печь» // Вестник Череповецкого государственного университета. 2017. № 2 (77). С. 23–30.
6. Лукин С.В., Левашев К.Ю., Збродов А.А. Математическое моделирование теплового состояния заготовки квадратного сечения в сортовой МНЛЗ и в термосе // Вестник Череповецкого государственного университета. 2018. № 3 (84). С. 37–45.

References

1. Lukin S.V., Igonin V.I., Kochkin A.A., Kibardin A.N., Muchin V.V., Antonova Yu.V. Optimalnye rezimy ohlazdeniya, termostatirovaniya i nagreva slyabov na linii “MNLZ – prokatnyi stan” [Optimum modes of cooling, thermostating and heating of slabs on the line “Continuous cast-

ing machine – rolling mill”]. *Vestnik Cherepovetskovo gosudarstvennogo universiteta* [Cherepoves State University bulletin], 2016, no. 6, pp. 16–20.

2. Lukin S.V., Kibardin A.N., Antonova Yu.V. Algoritm ozenki parametrov teplovogo sostoyaniya slyaba na linii “MNLZ – termosat – nagrevatel'naya pech” [“Algorithm of slab heat state parameters evaluation on the line “CCM – thermostat – heating stove”]. *Vestnik Cherepovetskovo gosudarstvennogo universiteta* [Cherepoves State University bulletin], 2017, no. 5, pp. 25–36.

3. Lukin S.V., Kibardin A.N., Sidorenkova S.E., Kochkin A.A. Optimizatsiya rezhimov nagreva i termostatirovaniya pri goryachem posade v nagrevatel'nye pechi [Heating and thermostating modes optimization at loading hot slabs in heating stoves]. *Vestnik Cherepovetskovo gosudarstvennogo universiteta* [Cherepoves State University bulletin], 2016, no. 3, pp. 7–11.

4. Lukin S.V., Kibardin A.N. Opimalnoe ispolzovanie fizicheskoy teploty slyabov posle MNLZ [“Optimal use of physical heat in slabs issuing CCM”]. *Metallurg* [Metallurgist], 2016, no. 7, pp. 38–43.

5. Lukin S.V., Kochkin A.A., Kibardin A.N., Antonova Yu.V., Muchin V.V., Igonin V.I. Algoritmy optimizatsiy rezhimov ohlazhdeniya, termostatirovaniya i nagreva slyabov na linii “MNLZ – nagrevatel'naya pech” [Algorithms of optimizing modes of slabs cooling, thermostating and heating on the line “ccm – heating stove”]. *Vestnik Cherepovetskovo gosudarstvennogo universiteta* [Cherepoves State University bulletin], 2017, no. 2, pp. 23–30.

6. Lukin S.V., Levashev K.Yu., Zbrodov A.A. Matematicheskoe modelirovanie teplovogo sostoyaniya zagotovki kvadratnogo secheniya v sortovoy MNLZ I v termose [“Mathematical modeling of heat condition of square cross section steel bar in the continuous bar-casting machine and in the thermos”]. *Vestnik Cherepovetskovo gosudarstvennogo universiteta* [Cherepoves State University bulletin], 2018, no. 6, pp. 37–45.

Для цитирования: Лукин С.В., Левашев К.Ю., Збродов А.А., Кибардин А.Н., Малыгин Л.Л. Системная и функциональная модели оценки теплового состояния стальной заготовки на технологической линии «МНЛЗ – нагревательная печь» // Вестник Череповецкого государственного университета. 2018. №5(86). С. 8–16. DOI: 10.23859/1994-0637-2018-5-86-1

For citation: Lukin S.V., Levashev K. Yu., Zbrodov A.A., Kibardin A.N., Malygin L.L. Systemic and functional models of evaluation of heat state of steel billet on the technological line “continuous casting machine – heating stove”. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2018, no. 5 (86), pp. 8–16. DOI: 10.23859/1994-0637-2018-5-86-1