

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИМИЗИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация. Реализация мероприятий по оптимизации энергоэффективности любого технологического процесса требует проведения анализа достигнутых результатов на уровне этого процесса. В работе приведены результаты оценки эффективности энергосберегающего управления процессом нагрева непрерывнолитых заготовок в нагревательной печи толкательного типа перед прокаткой. В результате анализа различных вариантов энергосберегающих режимов нагрева определено, что существует два принципиальных подхода к повышению энергоэффективности процесса нагрева заготовок перед прокаткой: достижение максимальной производительности прокатного стана при улучшении качества нагрева и достижение минимальной себестоимости горячекатаной полосы при сохранении существующей производительности технологического процесса прокатки. Реализация энергосберегающего управления процессом нагрева проводилась для нестационарных условий работы нагревательной печи и действия внешних возмущений. Результаты оценки эффективности реализованного энергосберегающего управления определены по оценке величины удельного расхода топлива на нагрев заготовок перед прокаткой, их конечного температурного состояния и затрат электрической энергии при прокатке заготовки в прокатных клетях стана. Установлено, что использование энергосберегающего управления нагревом металла в нагревательных печах прокатных станов при снижении удельных затрат топлива на нагрев на 2% обеспечило увеличение средней температуры раската на 4-5°C и снижение потребляемой электрической мощности на 0,027 МВт при суточной производительности прокатного стана 9-10 тыс. т/сут.

Ключевые слова: непрерывнолитая заготовка, нагрев заготовок перед прокаткой, нагревательная печь, энергосберегающий режим нагрева, нагрев металла перед прокаткой, стан горячей прокатки, оптимизация управления нагревом

Введение

Анализ эффективности работы оптимизирующих систем управления технологическим процессом часто сводится только к оценке общих производственных показателей предприятия в целом [1, 2]. Такая ориентация на итоговые показатели работы предприятия без учета влияния оптимизирующего управления на участок технологического процесса, к которому оно применяется, и ориентированная только на снижение материальных, энергетических и экономических затрат, губительна для управляемого производства. Это просто неизбежно, если не учитывается и не обеспечивается сохранение или даже увеличение объема производства и безусловное сохранение или даже улучшение качества конечного продукта.

Методика оценки экономической эффективности при реализации системы оптимизирующего управления реальным технологическим производственным процессом с учетом экономических показателей должна использоваться на том же уровне технологического процесса, на котором реализовывается система оптимального управления. Рассмотрим в качестве конкретного примера анализ результатов использования энергосберегающего процесса нагрева крупногабаритных и непрерывнолитых заготовок в нагревательных печах высокопроизводительного широкополосного стана горячей прокатки (ШСП).

Прокатный стан оборудован шестью нагревательными печами. Система оптимального управления нагревом реализована на одной нагревательной печи (печь №2 – опытная нагревательная печь). Остальные нагревательные печи реализовывали регламентированный нагрев заготовок. Заготовки выгружаются из

нагревательных печей последовательно и поступают в линию прокатного стана (рис. 1).

Таким образом, каждая шестая прокатываемая заготовка нагревалась по энергосберегающей технологии нагрева. Производилось сравнение параметров раската в прокатной клетке №4 для заготовок, которые нагревались с использованием регламентированной технологии нагрева, и заготовок, нагреваемых с использованием энергосберегающей технологии.

Отличительной особенностью рассматриваемого технологического процесса является наличие интенсивных технологических и производственных возмущений, оказывающих значительное влияние на итоговые параметры оценки эффективности управления процессом нагрева металла [3, 4]. К таким параметрам относятся [4]:

- величина удельного количества природного газа, затраченного на нагрев одной тонны; $\text{м}^3/\text{т}$;
- температурное состояние нагретого металла по температуре раската после черновой группы стана, °С;
- затраты электроэнергии при прокатке металла в черновой группе валков стана, МВт.

При реализации системы оптимизирующего управления процессом нагрева, кроме извлечения максимальной прибыли, необходимо формирование воздействий по повышению качества нагрева металла.

В условиях нестационарного режима работы широкополосного стана горячей прокатки (ШСП), когда часовая производительность непредсказуемо изменяется от 100 до 1000 т/ч, а суточная доля посада неостывших непрерывнолитых заготовок со средней температурой более 500°C изменяется от 48 до 87% от общего количества, обеспечение своевременного и качественного нагрева металла представляет достаточно на сложную задачу [5].

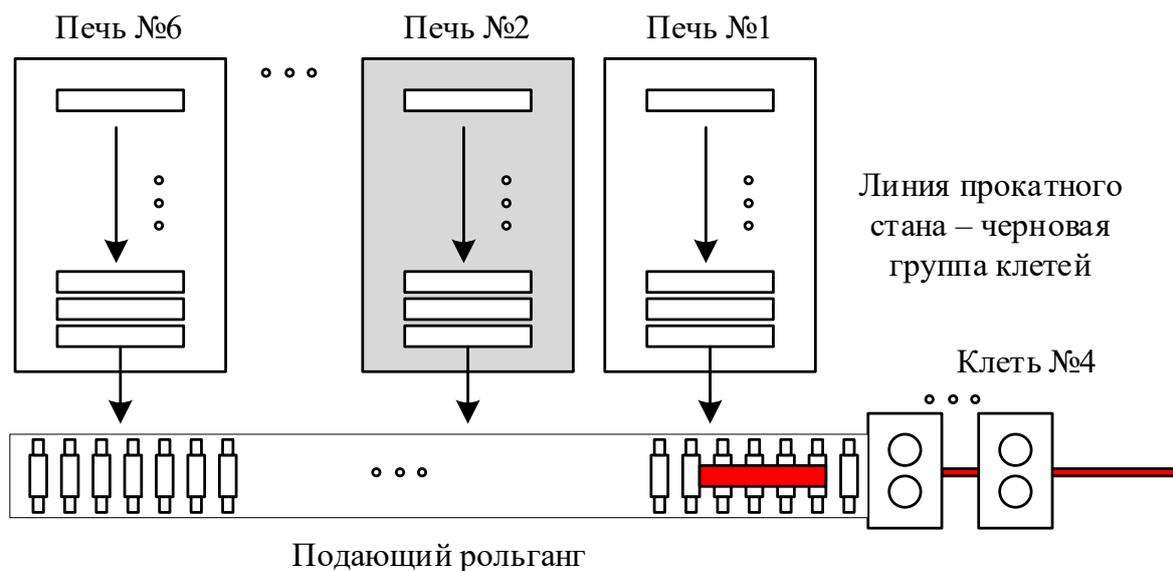


Рис. 1. Подача нагретых заготовок с участка нагрева на участок прокатного стана по подающему рольгангу

Поскольку экономические потери от простоя стана по причине отсутствия нагретого металла значительно превышают экономию природного газа при нагреве металла, то общепринятой концепцией стратегии распределения топлива по зонам нагрева методических печей и сама конструкция печей ориентированы на достижение максимальной производительности печи, то есть на стратегию максимального быстрого действия нагрева.

Это требует интенсификации нагрева, то есть увеличения подачи топлива сразу при входе металла в отапливаемые зоны печи, что увеличивает непроизводительные потери тепловой энергии с отходящими продуктами горения и потери металла с окислением, составляющие значительную (до 50%) долю в себестоимости нагрева [6].

При наличии резерва времени на нагрев, по сравнению с минимальным, в режиме работы печи с максимальной производительностью целесообразен оперативный переход на стратегию энергосберегающего режима управления нагревом при минимизации потерь металла с окислением [4, 7].

Эффективный оптимизирующий энергосберегающий режим управления нагревом, обеспечивающий минимизацию удельного количества топлива и потерь металла с окислением, реализуется при интенсификации режима нагрева на заключительном интервале общего времени нагрева или на конечном участке рабочего пространства нагревательной печи проходного типа [4, 5].

При существующей общепринятой конструкции рабочего пространства нагревательных печей проходного типа, благодаря наличию на выходе рабочего пространства зон выдержки (томильных) с пониженной тепловой нагрузкой, использование энергосберегающего режима управления нагревом проблематич-

но [8].

В условиях нестационарной работы прокатного стана переход на энергосберегающий режим управления нагревом на различных временных интервалах объективно увеличивает вероятность возникновения аварийной ситуации от поломки прокатных валков при прокатке недогретой заготовки [9].

Это справедливое, вполне очевидное и обоснованное обстоятельство необходимо было преодолеть при гарантированной реализации оптимизирующего энергосберегающего управления нагревом в реальных производственных условиях.

Техническое решение проблемы энергосберегающего оптимизирующего управления нагревом металла в условиях нестационарного режима работы ШСГП основано на совершенствовании информационного обеспечения, например при использовании интегрированных систем управления [10].

Совершенствование информационного обеспечения включает решение следующих информационных задач [11]:

1. Создание и реализация системы объективного и достоверного прогноза общего времени нагрева каждой подаваемой на нагрев в печь заготовки на момент её подачи в нагревательную печь с учётом текущей производительности ШСГП, размеров заготовок и скрытых, прогнозируемых и аварийных текущих простоев стана. Достигнутая точность прогноза $\pm 2-3\%$ при изменении общей продолжительности нагрева от 140 до 195 мин.

2. Создание и программная реализация системы оперативного и достоверного определения текущего температурного состояния каждой второй в очереди на выдачу из печи на стан заготовки для объективного контроля ожидаемой температуры раската этой заготовки после черновой группы ШСГП. Достигнута ре-

альная точность прогноза температуры раската в диапазоне $\pm 10^{\circ}\text{C}$ для 75,3%, а с точностью $\pm 20^{\circ}\text{C}$ – 97,4% выданных заготовок.

3. Разработка и реализация системы для повышения оперативности и объективности управления тепловым режимом, перевод системы управления тепловым режимом по температуре рабочего пространства в зонах нагрева, измеряемой термомпарами в защитных карборундовых стаканах, в систему управления по температуре поверхности нагреваемого металла, измеряемой оптическими пирометрами, свизированными на поверхность металла. Достигнуто увеличение оперативности информационного сигнала со 120 до 17–20 с, то есть более чем в 6 раз.

4. Теоретически обоснована и практически реализована система автоматической оптимизации управления процессом сжигания топлива в зонах интенсивного нагрева с использованием систем экстремального адаптивно-поискового управления путем обеспечения максимально возможной температуры рабочего пространства при сжигании поданного в зону топлива.

5. Уменьшение окалинообразования и минимизация тепловых потерь с подсосами и выбиваниями обеспечивается за счёт управления газодинамическим режимом рабочего пространства путём минимизации текущих величин разности коэффициентов расхода воздуха на входе и выходе рабочего пространства. Использование малоокислительного нагрева, как показал полученный опыт, нецелесообразно, поскольку увеличиваются закаты окалины при производстве броневого листового производства.

6. Главным и определяющим условием практической реализации прогрессивно развивающегося экономически оптимизирующего управления рассматриваемым процессом нагрева является теоретическое обоснование возможности практической реализации энергосберегающего управления путем эффективного распределения подачи топлива по зонам нагрева в зависимости от текущих производственных условий. Эта важнейшая проблема решена с использованием метода оптимизации управления в соответствии с принципом максимума Л.С. Понтрягина [7].

Многолетний опыт совершенствования вышеназванного информационного обеспечения позволил чётко и однозначно определить и реализовать стратегическую цель оптимизирующего энергосберегающего развивающегося управления: «Обеспечить за заданное время своевременный нагрев металла до заданного температурного состояния при минимальных затратах топлива на нагрев».

При практической реализации энергосберегающего режима управления возникает актуальная проблема оперативной и объективной оценки эффективности используемого метода с целью оперативного обоснованного приема решения о целесообразности дальнейшего использования этого метода.

Оперативный метод оценки экономической эффективности энергосберегающего управления технологическими процессами

Типовая общепринятая методика определения эффективности проводимых мероприятий требует значительных затрат времени (от 3 до 6 месяцев). Проведение одновременно нескольких энергосберегающих мероприятий усложняет определение эффективности каждого из них. Также при определении эффективности каждого из проводимых мероприятий требуется учитывать влияние технологических возмущений.

Для устранения отмеченных недостатков типовой методики и оперативного получения информации использована рассмотренная в работе [12] активная методика, основанная на использовании уникальных компенсирующих свойств ортогональных функций Уолша при переключении режимов работы двух противопоставляемых способов управления технологическим процессом. Доказано, что при равенстве объемов производства и количестве посада «горячего металла» [11] использование централизованной микропроцессорной системы энергосберегающего управления обеспечивает снижение удельного количества газа на $16 \text{ м}^3/\text{т}$ или более чем на 2% от общих удельных затрат [11].

Полученное снижение удельных затрат топлива при реализации стратегии энергосберегающего управления нагревом, при интенсификации нагрева за заключительным интервалом общего времени нагрева и наличии в нагревательной печи зоны выдержки с пониженной тепловой нагрузкой на выходе рабочего пространства типовой печи проходного типа, использование энергосберегающего режима не должно быть причиной вероятности выдачи на стан недогретой заготовки.

Для оценки влияния энергосберегающего режима на качество нагрева металла определялась величина температуры полосы после черновой группы клетей прокатного стана и затраты энергии при прокатке [13–15].

Определяемое значением температуры раската полосы после черновой группы ШСГП и энергетическими параметрами проката этой полосы в последней черновой клетки ШСГП было произведено определение ранее названных параметров для более чем 600 заготовок при различных режимах непрерывного управления нагревом.

Определение качества нагрева металла при различных методах управления нагревом

Учитывая важность получения объективной информации и тот факт, что первоначальное опытное использование энергосберегающего метода управления нагревом реализовано только на одной печи ШСГП, определение качества нагрева осуществлено в два этапа.

На первом этапе определено влияние текущего физического состояния опытной печи на качество нагрева относительно общего среднего качества нагрева всех печей ШСГП при существующем методе управления нагревом.

При существующем методе управления прокатано 12062 т (606 заготовок) за 9 часов работы стана при удельном количестве затраченного природного газа 61,96 м³/т. Средняя температура раската всех заготовок $t_{ст} = 1095^{\circ}\text{C}$ при среднеквадратичном отклонении $\sigma_{ст} = 14,53^{\circ}\text{C}$. Средняя температура раската заготовок, нагретых в опытной печи, составила $t_{п} = 1097,92^{\circ}\text{C}$ при среднеквадратичном отклонении 13,92[°]C. Значит, опытная печь по лучшему физическому состоянию обеспечивает температуру раската на 2,92[°]C больше, чем средняя температура раската по стану при существующей системе управления нагревом.

Распределение температур раската заготовок, нагретых во всех (в том числе и опытной) печах стана, и температур раската заготовок, выданных только из опытной печи, при функционировании энергосберегающего метода управления нагревом представлено на рис. 2.

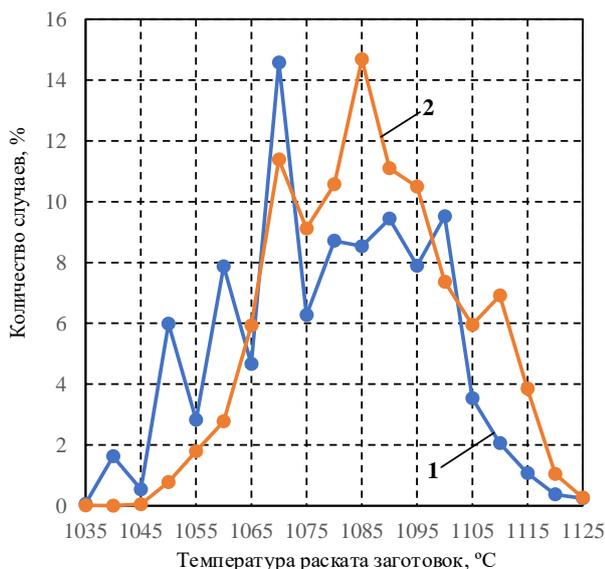


Рис. 2. Распределение температур раската заготовок, выданных из всех печей стана (линия 1) и из опытной печи (линия 2) при работе системы энергосберегающего управления режимом нагрева

Следует отметить, что при реализации энергосберегающего режима управления в опытной печи прокатано 10945 т металла за 13 часов при удельном количестве затраченного топлива 67,66 м³/т.

Поскольку случайно условия работы ШСГП при использовании энергосберегающего управления нагревом в опытной печи были значительно худшими, то этот факт убедительно подтверждает эффективность оптимизирующего управления нагревом в лю-

бых производственных условиях.

Средняя температура раската всех выданных на стан заготовок $t_{ст} = 1078,36^{\circ}\text{C}$ при среднеквадратичном отклонении $\sigma_{ст} = 18,76^{\circ}\text{C}$. Средняя температура раската заготовок, нагретых в опытной печи при $t_{п} = 1085,38^{\circ}\text{C}$ при среднеквадратичном отклонении $\sigma_{ст} = 15,95^{\circ}\text{C}$. Значит, средняя температура раската заготовок, нагретых в опытной печи, при меньшем на 2% удельном количестве затраченного топлива на 4–5[°]C больше, чем при существующем методе управления тепловым режимом.

Оценка влияния режима управления нагревом на величину затрат электроэнергии при прокатке осуществлена при определении средней мощности, потребляемой электроэнергией в последней черновой клетки ШСГП электроприводом этой клетки.

Средняя величина потребляемой электроприводом электроэнергии при прокатке всех нагретых заготовок при существующей системе управления нагревом составляет 6776 МВт, а нагретых только в опытной печи составляет 6497 МВт. Нагрузка электропривода при прокатке заготовок, нагретых в опытной печи, при существующем методе управления нагревом на 0,279 МВт меньше. Это определяется лучшим физическим состоянием опытной печи в текущий момент времени.

Распределение потребляемой электрической мощности при прокатке заготовок в последней черновой клетки ШСГП при энергосберегающем режиме нагрева опытной печи и всех печей стана представлено на рис. 3.

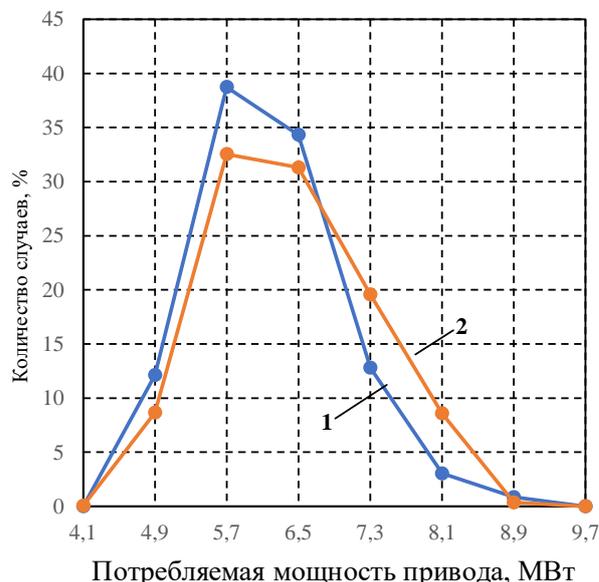


Рис. 3. Распределение потребляемой электрической мощности при прокатке в последней черновой клетки ШСГП при прокатке всех заготовок (линия 1) и заготовок, нагретых только в опытной печи при использовании в ней энергоуправляющего метода управления нагревом (линия 2)

Средняя величина нагрузки электропривода при прокатке всех заготовок (включая и опытную печь), нагретых в печах, составляет 6228 МВт, а при нагреве в опытной печи при энергосберегающем режиме управления составляет 5971 МВт.

Снижение среднего значения затраченной электрической мощности при прокатке одной заготовки составляет 0,022 МВт, или 22 кВт.

Практическая реализация оптимизирующего энергосберегающего автоматического управления тепловым режимом при нагреве металла в печах проходного типа даже в условиях нестационарных режимов работы ШСП не приводит к возможной вероятности выдачи на стан недогретых заготовок.

При снижении на 2% общих затрат удельного количества топлива обеспечено среднее увеличение температуры раската на 4-5°C и снижение затрат электрической энергии на 0,027 МВт при прокатке каждой заготовки при суточном объеме производства от 9000 до 10000 т.

Заключение

Для обеспечения перспективного развития промышленного производства необходимо, в зависимости от текущей реальной производственной ситуации, обоснованный выбор критерия или цели управления. Возможна реализация экстремального оптимизирующего поискового динамического способа управления процессом путем определения одного из двух главных критериев оптимизации управления [4]:

- достижение максимальной производительности процессами при улучшении качества производимого конечного продукта;
- достижение минимальной себестоимости производимого продукта при сохранении или увеличении объема и улучшение качества конечного продукта.

Только при реализации такой стратегии оптимизации управления возможно значительное повышение перспективности и эффективности развития промышленного производства.

Список литературы

1. Шаталов Р.Л., Генкин А.Л. Энергосберегающее управление как фактор интенсификации производства горячекатаных стальных полос // Материалы 1-й Международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в чёрной металлургии» (Череповец, 2013). Череповец: ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет», 2013. С. 388-394.
2. Генкин А.Л. Энергосберегающее управление листопрокатным комплексом «печи – стан» // Сталь. 2011. № 3. С. 34–40.

3. Расчетные исследования тепловой работы и совершенствование конструкции кольцевой печи ПАО «Челябинский трубопрокатный завод» для улучшения теплотехнических показателей ее работы / Н. В. Щукина, Н. А. Черемискина, Н. Б. Лошкарёв, В. В. Лавров // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 6. С. 431-437.
4. Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Оптимизация режимов управления нагревом заготовок в печах проходного типа: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 376 с.
5. Energy-saving optimal control over heating of continuous cast billets / B. N. Parsunkin, S. M. Andreev, O. S. Logunova, T. U. Akhmetov // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. Vol. 79. No. 9-12. P. 1797-1803. DOI: 10.1007/s00170-015-6934-4.
6. Малый С.А. Некоторые оптимальные режимы нагрева металла // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1966. № 9. С. 175.
7. Бутковский А.Г., Малый С.А., Андреев Ю.Н. Управление нагревом металла. М.: Металлургия, 1981.
8. О реализации энергосберегающих режимов нагрева непрерывнолитых заготовок перед прокаткой / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Д.Ю. Жадинский [и др.] // Сталь. 2005. № 12. С. 44-46.
9. Парсункин Б.Н., Андреев С.М. Прогнозирование продолжительности нагрева непрерывнолитой заготовки в методической печи с шагающими балками // Сталь. 2003. № 1. С. 71-74.
10. Интеграционный комплекс автоматизации стана 5000 ОАО «ММК» / В.Н. Урцев, Ф.В. Капцан, А.В. Фомичев и др. // Сталь. 2009. №7. С.46-50
11. Оперативное определение эффективности работы микропроцессорных систем управления технологическими процессами / А.В. Леднов, Б.Н. Парсункин, В.М. Рябков, Г.Ф. Обухов и др. // Сталь. 1987. №9. С.101-104.
12. Parsunkin B.N., Lednov A.V., Sukhonosova T.G. Testing signals formation for identification of heat power objects and control systems comparison // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. № 9–12 (93). С. 3429–3436.
13. Непрерывный контроль температуры жидкой стали в технологических агрегатах металлургического производства / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, А.Р. Бондарева, У.Б. Ахметов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2018. Т. 18. № 3. С. 33-41.
14. Самарина И.Г., Толстова Ю.С., Газизова В.А. Система экстремального регулирования с запоминанием максимума скорости изменения выходного параметра // Автоматизированные технологии и производства. 2019. №2. С. 14-18.
15. Прасолов А.С., Самарина И.Г., Бондарева А.Р. Моделирование системы экстремального регулирования на языке LAD // Автоматизированные технологии и производства. 2020. №1(21). С. 22-26

Сведения об авторах

Парсункин Борис Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления, институт энергетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: b.parsunkin@magtu.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1822-2632>

Андреев Сергей Михайлович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедры автоматизированных систем управления, институт энергетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: andreev.asc@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0735-6723>

Бондарева Альбина Робертовна – старший преподаватель кафедры автоматизированных систем управления, институт энергетики и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: a.bondareva@magtu.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1091-0107>

Чернов Виктор Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры литейных процессов и материаловедения, институт металлургии, машиностроения и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: tchernov@magtu.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ON DETERMINING THE ECONOMIC EFFICIENCY OF OPTIMIZING CONTROL OF TECHNOLOGICAL PRODUCTION PROCESSES

Parsunkin Boris N. – D.Sc. (Eng.), Professor, Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: b.parsunkin@magtu.ru

Andreev Sergey M. – D.Sc. (Eng.), Associate Professor, Head of the Automated Control System Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: andreev.asc@gmail.com

Bondareva Albina R. – Assistant Professor (Eng.), Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: a.bondareva@magtu.ru

Chernov Victor P. – D.Sc. (Eng.), Professor, Department of Foundry Processes and Materials, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tchernov@magtu.ru.

Abstract. The implementation of measures to optimize the energy efficiency of any technological process requires an analysis of the results achieved at the level of the process. The paper presents the results of evaluating the effectiveness of energy-saving control of the heating process of continuously cast billets in a pusher-type heating furnace before rolling. As a result of the analysis of various options for energy-saving modes of heating, it was determined that there are two fundamental approaches to improving the energy efficiency of the billets heating process before rolling: achieving maximum productivity of the rolling mill while improving the quality of heating and achieving the minimum cost of hot rolled strip while maintaining the existing productivity of the technological process of rolling. The implementation of energy-saving control of the heating process was carried out for non-stationary operating conditions of the heating furnace and the action of external disturbances. The results of assessing the effectiveness of the implemented energy-saving control are determined by evaluating the value of specific fuel consumption for billets heating before rolling, their final temperature state and electric energy consumption during rolling of billets in the rolling stands of the mill. It was found that the use of energy-saving control of metal heating in the heating furnaces of rolling mills with a 2% reduction in specific fuel costs for heating ensured an increase in the average temperature of the rolled metal by 4-5°C and a reduction in power consumption by 0.027 MW at a daily rolling mill productivity of 9-10 thousand tons/day.

Keywords: continuous casting, billet heating before rolling, heating furnace, energy-saving heating mode, heating of metal before rolling, hot-rolling mill, heating control optimization.

Ссылка на статью:

Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Бондарева А.Р., Чернов В.П. Об определении экономической эффективности оптимизирующего управления технологическими процессами прокатного производства // Теория и технология металлургического производства. 2022. №1(40). С. 30-36.
Parsunkin B.N., Andreev S.M., Bondareva A.R., Chernov V.P. On determining the economic efficiency of optimizing control of technological production processes. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 40, no. 1, pp. 30-36.