

УДК 669.013.5

Д.В. СТАЛИНСКИЙ, докт. техн. наук, профессор, генеральный директор,**А.С. РУДЮК**, канд. техн. наук, директор структурного подразделения,**В.С. МЕДВЕДЕВ**, докт. техн. наук, главный научный сотрудник,**Ю.Б. КРЮКОВ**, заведующий отделом, **В.С. БАРАНЕНКО**, заместитель директора структурного подразделения
Украинский государственный научно-технический центр «Энергосталь» (УкрГНТЦ «Энергосталь»), г. Харьков

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СОЗДАНИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МИНИ-ЗАВОДОВ

Рассмотрены вопросы ресурсо- и энергосбережения при создании металлургических мини-заводов по производству проката. Определены наиболее перспективные технологии выплавки и разливки стали, прокатки профилей из непрерывно-литых заготовок. Предложено совмещение непрерывной разливки с прокаткой (горячий посад), использование гибких безынерционных способов нагрева металла, оптимизация сечений и массы исходных заготовок, температурных и деформационно-скоростных режимов прокатки и др.

Ключевые слова: мини-завод, выплавка стали, разливка стали, прокатка, ресурсо- и энергосберегающие технологии.

В последние десятилетия одним из приоритетных направлений развития черной металлургии является строительство электрометаллургических мини-заводов. Такие заводы обеспечивают существенный экономический эффект и имеют экологические преимущества по сравнению с капиталозатратными и энергоемкими заводами полного металлургического цикла.

Основные предпосылки создания металлургических мини-заводов:

- наличие устойчивого спроса на металлопродукцию;
- возможность размещения в непосредственной близости от основных потребителей продукции;
- наличие крупных ломозаготовительных компаний и дешевого сырья;

- небольшие транспортные издержки на доставку сырья и готовой продукции;
- минимальные капитальные затраты;
- возможность использования существующей инфраструктуры;
- экономическая эффективность;
- экологическая безопасность и др.

Успешное функционирование металлургических предприятий напрямую связано с применением передовых энерго- и ресурсосберегающих технологий и оборудования [1–4]. Использование в качестве исходного сырья вторичных ресурсов в большой степени решает проблему энергосбережения [5, 6]. Экономия энергоресурсов достигается прежде всего благодаря исключе-

нию агломерационного и доменного производств из технологического цикла и переходу на выплавку стали в дуговых электропечах. Следует подчеркнуть, что расход топливно-энергетических ресурсов на мини-заводах составляет 250–300 кг у.т./т, тогда как на металлургических предприятиях с полным производственным циклом – 655–870 кг у.т./т [5–9], расходы электроэнергии меньше в 4 раза, воды – в 1,5 раза, отходов на 1 т готовой продукции – в 3–4 раза.

В УкрГНТЦ «Энергосталь» на протяжении ряда лет ведутся работы по созданию базовых технологий и эффективных металлургических мини-заводов небольшой мощности для производства широкого сортамента сортового проката. Разработан общий системный подход к решению задач технологического обеспечения проектирования процессов прокатки простых и фасонных профилей общего и специального назначения, осуществлена алгоритмизация технологического процесса, начиная с выбора оптимальных размеров исходных заготовок до получения готового профиля. С использованием компьютерного моделирования разработано 5 типов мини-заводов с объемом производства от 15 до 200 тыс. т/год.

Сортамент продукции мини-заводов включает сортовой прокат:

- круг диаметром 12–36 мм;
- арматуру № 12–36 обычную и термоупрочненную;
- квадрат со стороной 12–30 мм;
- уголки 25x25–45x45 мм;
- швеллер № 5;
- полосы толщиной от 4 до 20 мм и шириной от 20 до 70 мм;
- специальные фасонные профили для борон, бичей зерноуборочных комбайнов и другие.

Марки производимых сталей: сталь углеродистая обыкновенного качества, сталь качественная конструкционная, сталь низколегированная.

Характерными особенностями современной концепции металлургического мини-завода являются новые технологические процессы и агрегаты, адаптированные для малых и сверхмалых производств, а также высокая степень их функциональной совместимости в едином технологическом цикле. Обычно мини-заводы состоят из участков подготовки лома к плавке, электродуговой печи, внепечной обработки стали, разливки стали и получения сортовых заготовок, прокатного стана, отделки металлопродукции.

Технологическое оборудование для производства проката малотоннажными партиями должно быть максимально дешевым, занимать минимальную площадь, обеспечивать быструю переналадку при переходе с одного вида продукции на другой и иметь минимальные эксплуатационные затраты.

Основные требования к металлургическим мини-производствам:

- простота и надежность оборудования;
- малая масса и низкая стоимость оборудования, адекватные производительности;
- высокая жесткость рабочих клетей, обеспечивающая заданную точность проката;
- высокая износостойкость технологической оснастки, удобная и быстрая замена.

Создание экономичных мини-заводов основывается на концептуальных подходах с применением новых технических решений и энергосберегающих технологий и предусматривает максимальное использование существующих зданий, сооружений и коммуникаций.

К основным современным энергосберегающим технологиям в производстве проката на мини-заводах относятся:

- создание литейно-прокатных комплексов;
- совмещение непрерывной разливки с прокаткой (горячий посад);
- использование гибких безынерционных способов нагрева металла;
- оптимизация сечений и массы исходных заготовок;
- оптимизация температурных и деформационно-скоростных режимов прокатки;
- низкотемпературная и контролируемая прокатка;
- термическая обработка с использованием тепла прокатного нагрева;
- совершенствование схем расположения оборудования прокатных станов и др.

Максимальный эффект применения данных технологий обеспечивается комплексным их использованием – положительные стороны одних технологий усиливаются за счет одновременного использования с другими.

Предлагаемый подход был реализован УкрГНТЦ «Энергосталь» при разработке проектных предложений по созданию мини-завода с объемом производства 200 тыс. т в год арматурного проката.

Сортамент такого завода достаточно узок – термомеханически упрочненная и неупрочненная стальная арматура диаметром от 8 до 14 мм по ГОСТ 5781-82 и ГОСТ 10884-94.

В данном проекте за счет рационального выбора состава, характеристик и схемы расположения оборудования в максимальной степени реализован принцип литейно-прокатного комплекса. Технические характеристики оборудования выбраны таким образом, чтобы часовая производительность основных металлургических агрегатов на всех этапах технологического процесса (выплавка, разливка, прокатка) была одинаковой (30 т/час), что позволяет максимально использовать тепло, накопленное

металлом в процессе выплавки, для процессов разлива и прокатки.

По оценкам специалистов, 80 % энергии в прокатном производстве затрачивается на обычный нагрев металла до 1150 °С, 17 % – на прокатку и только 3 % – на вспомогательные операции. Весьма существенным мероприятием, обеспечивающим значительную экономию энергоресурсов, является горячий посад металла в нагревательные печи прокатных станов. Тепловые расчеты нагрева металла в газовых печах показывают, что при горячем посаде заготовок с температурой 800 °С расход тепловой энергии уменьшается на 37 % (по сравнению с холодным посадом). Создание металлургического мини-завода как единого литейно-прокатного комплекса позволяет довести долю горячего посада (при безаварийной работе) практически до 100 %.

Особенно эффективен горячий посад в сочетании с индукционной нагревательной установкой. В этом случае экономия энергии при нагреве может достигать 65 % за счет максимально возможного использования теплосохранения заготовки и уменьшения потерь энергии в окружающую среду при высокоскоростном нагреве, а также вследствие отсутствия затрат электроэнергии на холостом ходу.

В условиях продолжающегося роста цен на природный газ определяющим фактором при выборе теплоносителя для нагрева металла, учитывая все теплотехнические, технологические и экологические особенности газового и электрического нагрева, является стоимость необходимой тепловой энергии в эквиваленте 1 кВт·час. При этом эффективность использования тепловой энергии для нагрева определяется двумя показателями: термическим коэффициентом полезного действия (η_t) и коэффициентом использования топлива (КИТ).

Более показательным с точки зрения эффективности использования тепловой энергии является η_t , поскольку этот показатель учитывает конструкцию печи (футеровку, герметичность и др.).

Сравнение эффективности использования природного газа и электроэнергии в процессах нагрева приведено в табл. 1. Преимущество электронагрева в сравнении с газовым очевидно, поскольку этот метод нагрева может широко использоваться при непрерывном нагреве единичных заготовок.

Таблица 1 – Сравнение эффективности использования природного газа и электроэнергии

Показатели эффективности	Газовый нагрев	Индукционный нагрев
Термический КПД η_t	0,1–0,3	0,6–0,8
КИТ	0,3–0,5	1,0

Для сравнения энергозатрат при газовом и электрическом нагреве металла приведем расчет стоимости тепловой энергии в эквиваленте 1 кВт·час для нагревательной печи непрерывного действия производительностью 25 т/час (табл. 2). Годовой фонд рабочего времени – 7800 час. Годовая производительность – 200 тыс. т. Базой для расчета является известная зависимость: 1 кВт·час эквивалент 860 ккал. Термический КПД η_t для газового нагрева принимаем равным 0,25, для индукционного – 0,7. Стоимость 1 кВт·час электроэнергии – 0,8 грн; 1 м³ природного газа – 3,5 грн.

Таблица 2 – Стоимость затрачиваемой на нагрев тепловой энергии в эквиваленте 1 кВт·час

Показатель	Затрачиваемая тепловая энергия	
	Природный газ	Электроэнергия
Эквивалент 1 кВт·час	0,106 м ³	1,0 кВт·час
Эквивалент 1 кВт·час с учетом η_t	0,42 м ³	1,43 кВт·час
Стоимость энергии в эквиваленте 1 кВт·час	1,50 грн	1,14 грн

Как показывает расчет, расход тепловой энергии, получаемой сжиганием природного газа (в экв. 1 кВт·час) и затрачиваемой на процесс нагрева металла, в 3 раза выше ее стоимости и в 1,3 раза выше стоимости электроэнергии (индукционный нагрев).

Следует отметить и другие преимущества электронагрева:

- высокая скорость и качество нагрева заготовок;
- отсутствие окалинообразования;
- высокая точность и стабильность регулирования температуры и мощности;
- компактность конструкции индукционной нагревательной установки;
- простота пуска и эксплуатации;
- полное отсутствие вредных выбросов в окружающую природную среду.

Таким образом, одним из направлений повышения качества нагрева заготовок перед прокаткой и энергосбережения в прокатном производстве является использование индукционного электронагрева, который особенно эффективен на малотоннажных станах широкого сортамента, где имеют место частые простои при перевалках, переходах с профиля на профиль и настройках стана.

Применение индукционных нагревательных устройств обеспечивает высокоскоростной нагрев металла практически без угара, при этом реальная экономия энергии на всем переделе – от лома до готового проката – составляет 25–30 %, что позволяет отнести

индукционный нагрев к наиболее эффективным энерго-сберегающим технологиям.

В проект металлургического мини-завода производительностью 200 тыс. т/год заложена индукционная установка со следующими техническими характеристиками:

- максимальный размер нагреваемых заготовок – 125x125x3000 мм;
- температура нагрева металла – 1150 °С;
- мощность индукторов – 3000 кВт;
- частота тока в индукторе – 1000 Гц;
- производительность установки при горячем посаде – 30 т/час, при холодном посаде – 18 т/час;
- время нагрева при горячем посаде – 150 с, при холодном посаде – 250 с; темп выдачи – 45 с;
- расход технической воды на охлаждение – 20 м³/час.

Практический опыт совмещения работы машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и прокатного стана показывает необходимость применения буфера-накопителя для компенсации возможных отклонений в технологических циклах разливки и прокатки. В данном проекте в качестве такого буфера-накопителя предусмотрен шлеппер горячего посада заготовки, что исключает дополнительные капитальные затраты, поскольку шлеппер выполняет функции буфера-накопителя дополнительно к своему основному предназначению – передаче заготовки от МНЛЗ к индукционной нагревательной установке.

Кроме того, такая синхронизация работы различных агрегатов позволяет резко повысить коэффициент использования оборудования, что обуславливает снижение капитальных затрат и уменьшение расхода энергии, затрачиваемой на вспомогательные нужды агрегатов (охлаждение, смазку, вентиляцию, холостой ход и т.п.). По различным оценкам, экономия энергии при этом может составить 3–5 %.

На стадии прокатки, как и при нагреве металла, экономия энергоресурсов может достигаться путем внедрения рациональных температурно-скоростных и деформационных режимов прокатки и совершенствования оборудования прокатных станов.

Для определения экономически целесообразной технологии прокатки малотоннажных профилей были рассмотрены варианты использования непрерывной, последовательной, реверсивной прокатки на непрерывных, линейных, последовательных и шахматных станах с клетями дуо и трио, а также с использованием агрегатов высоких обжатий и пр. Анализ этих вариантов показал, что требованиям, предъявляемым к малотоннажному производству, в наибольшей степени соответствует прокатка фасонных профилей на полунепрерывном стане, включающем отдельно стоящую обжимную клеть и чистовую непрерывную группу клетей.

Клеть трио, предусмотренная данным проектом, даже с учетом необходимости подъемно-качающегося стола, является наименее сложным видом оборудования – имеет простой нереверсивный и нерегулируемый привод. При небольшой длине заготовки клеть трио отличается очень высокой производительностью, ее работа полностью обеспечивается с помощью простейших средств механизации и автоматизации. Клеть трио отличается максимальным использованием бочки валков и минимальным расходом энергии и валков на единицу выпускаемой продукции.

Рекомендуется установка непрерывной группы клетей на чистовой линии малотоннажного стана, поскольку ее преимущества в сравнении с другими техническими решениями очевидны. Непрерывная прокатка позволяет обеспечить необходимый температурно-скоростной режим и достичь максимальной производительности при минимальных габаритах и массе прокатного стана. Применение вертикальных клетей дает возможность повысить качество проката, устраняет необходимость кантовок, упрощает настройку стана и, соответственно, снижает расходный коэффициент. Учитывая указанные преимущества, в чистовой линии прокатного стана применены две 6-клетевые непрерывные группы. Имеющиеся в настоящее время надежные способы регулирования натяжения раскатов в межклетевых промежутках непрерывных групп клетей позволяют получать стабильные размеры профиля по всей его длине, что подтверждается многолетним положительным опытом производства фасонных профилей сложной формы на полунепрерывном стане 250 Нижнесергинского металлургического завода.

Процесс горячей прокатки характеризуется разогревом раската при деформации – с увеличением скорости прокатки на непрерывных станах этот разогрев превышает потери тепла (происходит повышение температуры раската), что приводит к нерациональному расходу энергии на прокатку, ухудшает структуру и механические свойства готового проката, увеличивает затраты энергии на его охлаждение. В идеале температура проката должна оставаться постоянной, близкой к температуре конца прокатки. Наиболее простой путь регулирования температуры раската – за счет скоростного режима прокатки. Снижение скорости прокатки в чистовых клетях непрерывных станов ведет к снижению производительности, что связано с константой калибровки и ограничением минимальными скоростями прокатки, а также падением температуры в черновых клетях. В этом случае возможности изменений минимальны.

При непрерывной прокатке наибольшее падение температуры раската наблюдается по ходу прокатки в первых проходах. Из-за малой скорости прокатки значительное количество тепла теряется за счет излучения и

конвекции во время пауз между проходами. Увеличение скорости прокатки, как правило, невозможно из-за необходимости соблюдения константы калибровки и возрастания мощности прокатки в черновых клетях.

Использование полунепрерывной схемы стана позволяет частично решить эту проблему. По сравнению с прокаткой на непрерывном стане, на полунепрерывном можно увеличить скорость прокатки в первых клетях и уменьшить в последних. Экономия энергии в этом случае достигается без увеличения расхода инструмента и степени загрузки оборудования, что характерно для низкотемпературной прокатки.

Скорость прокатки в чистовой клети в данном проекте составляет от 6 до 10 м/с. Такие умеренные скорости позволяют избежать излишних затрат энергии на разогрев металла в непрерывных группах клетей. Расчеты показывают, что температура раската практически постоянна и составляет 950–1000 °С, экономия энергии при таком подходе достигает 20 %. Возможность экономии энергозатрат путем изменения скоростного режима прокатки представлена в литературе [10, 11].

Кроме того, эффект от этой схемы усиливается за счет уменьшения длины стана и снижения массы оборудования, в т.ч. и вспомогательного (межклетевые столы, рольганги и др.). Сокращаются также крановые операции, длина технологических потоков, затраты на отопление и вентиляцию и т.д. Все это позволяет снизить расход энергоносителей на 5–10 %.

К энергосберегающим технологиям следует отнести также термическую обработку с использованием тепла прокатного нагрева. Такая технология позволяет обеспечить значительное удельное снижение негативного воздействия на окружающую среду:

- во-первых, термическая обработка повышает качества металлопродукции, что позволяет экономно расходовать металл;
- во-вторых, для собственно термообработки не требуется дополнительного (повторного) нагрева, а рационально используется тепло прокатного нагрева, чем обеспечиваются экономия энергоресурсов и снижение вредных выбросов;
- в-третьих, сокращаются потери металла в окалину, что особенно актуально при производстве профилей с малыми размерами поперечного сечения (арматура и катанка).

Кроме того, экономятся значительные производственные площади, требуется меньше оборудования.

За счет умеренных скоростей прокатки в чистовой клети стана расход воды на термообработку уменьшен на 20–50 % по сравнению с традиционными техническими решениями.

ВЫВОДЫ

Разработанные УкрГНТЦ «Энергосталь» металлургические мини-заводы по производству проката малотоннажных профилей из непрерывно-литых заготовок с объемом производства до 200 тыс. т в год за счет комплексного использования ресурсо- и энергосберегающих технологий по технико-экономическим показателям, в т.ч. по расходу материальных и энергетических ресурсов, находятся на уровне лучших мировых образцов, а по некоторым показателям (удельный вес горячего посада) превышают мировой уровень.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Сталинский, Д.В.** Отраслевая программа энергосбережения как наиболее эффективная форма организации работ по снижению энергозатрат на предприятиях ГМК Украины / Д.В. Сталинский, В.А. Ботштейн // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – № 4. – С. 1–3.
2. **Большаков, В.И.** Проблемы научно-технического развития черной металлургии / В.И. Большаков, Л.Г. Тубольцев // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2001. – № 2. – С. 3–8.
3. **Сталинский, Д.В.** Резервы энергосбережения на предприятиях горно-металлургического комплекса. Основные задачи и перспективы их реализации / Д.В. Сталинский, В.А. Ботштейн, В.В. Лесовой // Экология и промышленность. – 2006. – № 1. – С. 4–7.
4. **Большаков, В.И.** Перспективы энергосбережения в черной металлургии Украины / В.И. Большаков, Л.Г. Тубольцев // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – № 3. – С. 1–5.
5. **Лоскутов, А.Б.** Основные направления энергосбережения на предприятиях черной металлургии / А.Б. Лоскутов и др. // Энергоэффективность: опыт, проблемы, решения. – 2003. – Вып. 1. – 7 с.
6. **Смирнов, В.С.** Металлургические мини-заводы / В.С. Смирнов и др. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 469 с.
7. **Чоджой, М.Х.** Энергосбережение в промышленности: пер. с англ. / М.Х. Чоджой. – М.: Металлургия, 1982. – 272 с.
8. **Егоричев, А.П.** Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов / А.П. Егоричев и др. – М.: Металлургия, 1990. – 149 с.
9. **Mini-Mills Are Growing, Becoming More Sophisticated** // 33 Metal Producing. – 1989. – V. 27, № 3. – P. 32.
10. **Жучков, С.М.** Возможности сокращения энергозатрат при производстве сортового проката / С.М. Жучков // Сталь. – 2006. – № 7. – С. 47–49.

11. **Жучков, С.М.** Методы оперативного управления составляющими теплового баланса раската на непрерывном сортовом стане / С.М. Жучков, А.П. Лохматов, Л.В. Кулаков

// Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : сб. науч. тр. ИЧМ НАН Украины. – К. : Наукова думка, 2002. – Вып. 5. – С. 166–169.

Поступила в редакцию 15.04. 2011

Розглянуто питання ресурсо- та енергозбереження при створенні металургійних міні-заводів з виробництва прокату. Визначено найбільш перспективні технології виплавки і розливу сталі, прокатки профілей з безперервно-литих заготовок. Запропоновано поєднання безперервного розливу з прокаткою (гарячий посад), використання гнучких безінерційних способів нагріву металу та оптимізацію зрізів і маси вихідних заготовок, температурних і деформаційно-швидкісних режимів прокатки тощо.

Questions of resource and energy-saving at setting up mini steel works for producing rolled products are considered. The most promising technologies of steel smelting and casting, rolling of shapes from continuously cast billets are determined; it is suggested a combination of continuous casting process with rolling (hot fit), use of flexible inertialess methods of metal heating, optimization of section and mass of initial workpieces, temperature and de-formative-and-speed modes of rolling etc.