



Modern approaches at designing and building of metallurgical lines of factories of last generation are considered.

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, И. А. ТРУСОВА, БНТУ

УДК 669.013

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ЗАВОДОВ ПОСЛЕДНЕГО ПОКОЛЕНИЯ

Производство стали в мире в целом имеет устойчивую тенденцию роста: в 1970 г. произведено 600 млн. т, в 2000 г. – 850 млн. т, в 2007 г. – 1344,1 млн. т. В 2008–2009 гг. в связи с разразившимся экономическим кризисом отмечался некоторый спад производства стали (рис. 1), но в 2010 г. мировое производство стали достигло рекордного уровня после отмеченного двухлетнего спада. По оценке World Steel Association, объем производства составил почти 1,414 млрд. т, что на 15% превзошло объем производства 2009 г. и на 6,3% – 2008 г. Но, вместе с тем, на сегодняшний день резерв мощностей для производства стали в мире находится на уровне 1458 млн. т. В 2015 г. предполагается довести мировое производство стали до 1800 млн. т (рост на 25%).

Превышение над докризисным уровнем обеспечили азиатские производители, которые в 2010 г. увеличили выпуск стали по сравнению с 2008 г. на 16,4%. Также превышение производства над докризисным уровнем наблюдалось на Ближнем Востоке и в Африке. Вместе с тем, как в Европе, так и в Северной Америке объем производства стали в 2010 г. был ниже, чем в 2008 г. (на 8 и 10,2% соответственно) [1].

Лидирующие позиции по объему производства за последние 10 лет занимает Китай, в 2010 г. в стране было произведено более 40% от мирово-

го объема стали, что обусловлено, в первую очередь, массовым переносом в страну производственных мощностей западных компаний и реализацией большого количества инфраструктурных проектов. Так, в 2001–2008 гг. спрос на металл со стороны Китая возрастал на 25% в год, а мировое производство стали увеличивалось ежегодно на 7%.

Второе место после Китая занимает Япония (около 8%), затем следуют США (около 6%), Россия (около 5%) (табл. 1). В целом более 80% (81,3%) производимой в мире стали приходится на долю указанных десяти стран.

Таблица 1. Крупнейшие производители стали в мире

Страна	Объем производства в 2010 г., млн т	Отношение к мировому производству стали, %
Китай	627,7	44,4
Япония	109,6	7,75
США	80,6	5,7
Россия	67,0	4,74
Индия	66,8	4,7
Южная Корея	58,5	4,14
Германия	43,8	3,1
Украина	33,6	2,4
Бразилия	32,8	2,32
Турция	29,0	2,05

Источник: World Steel Association, Steel Statistics 2010.

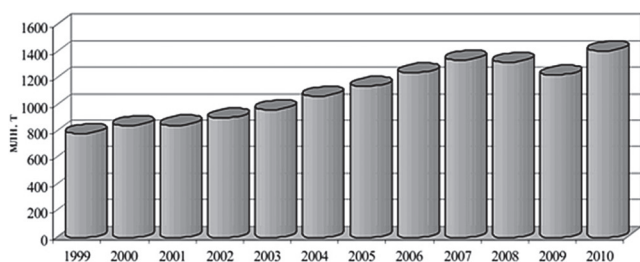


Рис. 1. Производство стали в мире

Учитывая уровень развития передовых стран мира и Европы, следует отметить, что для таких высокоразвитых стран, как США, Япония, Германия, Австрия, Великобритания, удельное производство стали на одного жителя составляет: в Японии – 1 т/чел; Австрии – 0,67; Германии – 0,45–0,5; США – 0,3 т/чел. Передовая и технически развитая страна должна производить стали на одного жителя практически 0,5 т/чел. Таким образом,

в Республике Беларусь в этом направлении имеются длительные перспективы.

В настоящее время в мировой металлургической практике в укрупненном плане принято различать предприятия полного металлургического цикла (или интегрированные металлургические заводы) и металлургические мини-заводы. Предприятия полного металлургического цикла предполагают переработку железоуглеродистого сырья (получение агломерата), производство жидкого передельного чугуна в доменных печах, получение стали преимущественно в кислородных конвертерах, разливку стали, как правило, на МНЛЗ или в слитки, а также систему прокатных станов. Производительность таких предприятий составляет 3 млн. т в год и более.

Металлургический мини-завод (предприятие с неполным металлургическим циклом) включает в себя производство жидкой стали, как правило, в дуговых сталеплавильных печах, участок внепечной обработки, машину непрерывной разливки, нагревательную печь, прокатный стан. Объем производства находится на уровне от 0,2 до 1,6 млн. т в год. Годовая производительность среднего мини-завода (классическая схема) составляет от 0,8 до 1,2 млн. т в год.

Предлагается также следующая классификация металлургических мини-заводов по производительности [2]: микро-заводы (мощность 40–230 тыс. т в год), миди-заводы (мощность 230–600 тыс. т в год), мини-заводы (мощность 600–2000 тыс. т в год).

На сегодняшний день в мире насчитывается порядка 1000 мини-заводов различной производительности и уровня технологии, которые производят более 15% металлопроката [2]. Наибольшее распространение мини-заводы получили в Индии, США, Японии, Китае, странах СНГ, Италии (табл. 2). Это предопределено прежде всего экономическим аспектом.

Наибольшее распространение получили мини-заводы с мощностью до 400 тыс. т в год, далее по мере увеличения производительности количество заводов снижается. Наиболее оптимальным и рентабельным является функционирование металлургических мини-заводов производительностью от 200–300 до 700–800 тыс. т в год (рис. 2). В первую очередь, с точки зрения оптимального использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), стабильности работы электродуговых печей (поддержания напряжения и мощности трансформаторов, работы электрических дуг в печах), функциональной дееспособности прокатного производства. В частности, для таких предприятий по-

Таблица 2. Распространение мини-заводов в мире

Страна	Количество мини-заводов	Суммарная потенциальная мощность мини-заводов, тыс. т/год
Индия	102	12917
США	88	48946
Япония	67	8210
Китай	45	3700
СНГ	36	27359
Тайвань	36	8002
Италия	32	2420
Бразилия	26	8913
Испания	24	12382
Мексика	23	9272
Германия	21	9595
Корея	18	9372
Турция	16	6550
Индонезия	16	2810
Франция	15	3900
Канада	14	6958
Таиланд	13	4941
Австралия	12	12870
Египет	9	2668
Венесуэла	8	5500
Великобритания	8	3343
Аргентина	7	4500
Бельгия	7	5320
Малайзия	7	4520

требление ТЭР находится на уровне от 100 до 400 тыс. т у.т., а для интегрированных заводов с объемом производства 4 млн. т стали в год – 3 млн. т у.т.

Для оценки взаимосвязи энергоемкости промышленной продукции и рентабельности предприятий используется так называемое технологическое топливное число (ТТЧ). Этот показатель, прежде всего, показывает затраты тепловой и электрической энергии на всех переходных периодах от добычи сырья из недр до получения товарной продукции. Показатели ТТЧ для основных разновидностей металлопродукции приведены в табл. 3.

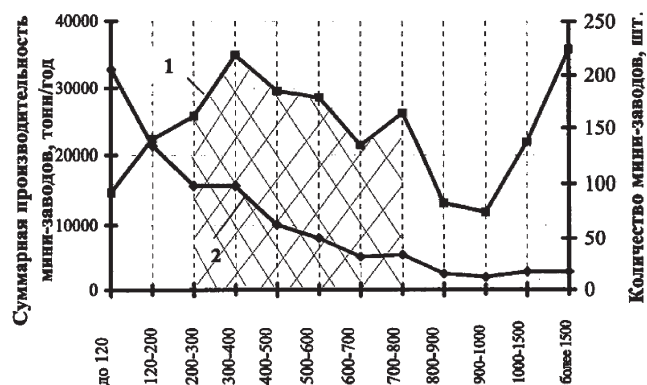


Рис. 2. Диапазон производительности мини-заводов, тыс. т/год: 1 – мощность мини-заводов, тыс. т; 2 – количество мини-заводов

Таблица 3. Технологические топливные числа

Наименование	ТТЧ, кг у.т./т
Окатыши	150–190
Чугун (передельный и литейный)	1050–1150
Ферросплавы	2500–3000
Сталь (слитки и заготовки)	600–1400
Прокат	1100–1600
Сортовой прокат	1500–2500
Рельсы	1300–1400
Обсадные трубы	1200–1900
Колеса железнодорожных вагонов	1900–2100

На основании анализа мирового опыта строительства и эксплуатации мини-заводов, собственных исследований в области создания энерго- и ресурсосберегающих технологий выплавки, затвердевания, разливки и нагрева стали [3–6] сформулированы определяющие положения концепции высшего технического уровня по сквозной технологии металлургического мини-завода. При этом следует отметить, что концепция высшего технического уровня включает в себя три направления производства жидкой стали:

- на базе современных процессов бескоксовой металлургии;
- при использовании современных доменных печей малой и средней мощности (около 1,0–2,0 млн. т в год);
- на базе электросталеплавильных технологий современного уровня.

Следует отметить следующие преимущества строительства мини-заводов в рамках первого и второго направлений: возможность практически полностью отказаться от таких дефицитных сырьевых материалов, к которым относятся металло-

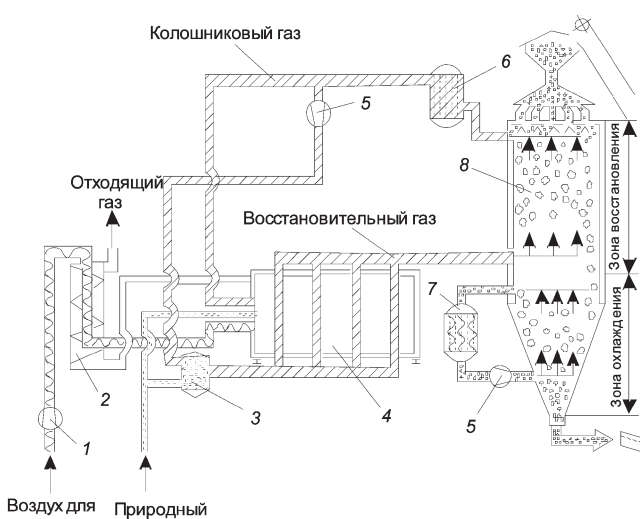


Рис. 3. Схема производства металлизированных окатышей по технологии Мидрекс: 1 – воздуходувка; 2 – теплообменник; 3 – смеситель газов; 4 – конвертер; 5 – компрессор; 6, 7 – скруббер для колошниковых газов; 8 – шахтная печь

лом и металлизированные окатыши; возможность воспроизводства за счет применения побочных продуктов (колошниковых газов) дополнительной электроэнергии путем создания мини-ТЭЦ; использование для производства стали кислородно-конвертерных технологий, обладающих низкой энергоемкостью и т. д.

Первое направление. Среди процессов бескоксовой металлургии наибольшее распространение получили такие промышленно освоенные процессы, как Мидрекс для производства металлизированных окатышей из железорудных окатышей (рис. 3) и Корекс для получения жидкого чугуна из железорудного концентрата (рис. 4) [7].

Заводы с использованием процессов бескоксовой металлургии, как правило, структурируются вблизи от месторождений железорудного сырья. Примером такого завода на постсоветском пространстве является Оскольский электрометаллургический комбинат с использованием Мидрекс-технологии по замкнутому циклу, расположенный недалеко от Лебединского горно-обогатительного комбината. Вместе с тем, полагаем, что даже если плечо доставки железорудного сырья находится на уровне 1000 – 1500 км, это будет достаточно эффективно.

Если рассмотреть Корекс-технологию для производства жидкого чугуна (металлургический завод с использованием процесса Корекс впервые был построен в ЮАР), то при быстрой (эффективной) транспортной доставке железной руды и каменных углей практически любого качества такое производство становится эффективным.

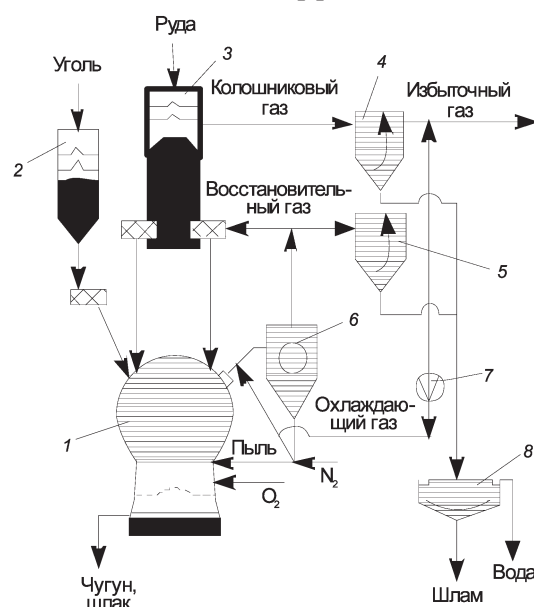


Рис. 4. Схема производства чугуна по технологии Корекс: 1 – реактор-газификатор; 2 – угольный бункер; 3 – шахтная печь; 4 – скруббер колошниковых газов; 5 – водяной холодильник; 6 – циклон; 7 – нагнетатель; 8 – сгуститель

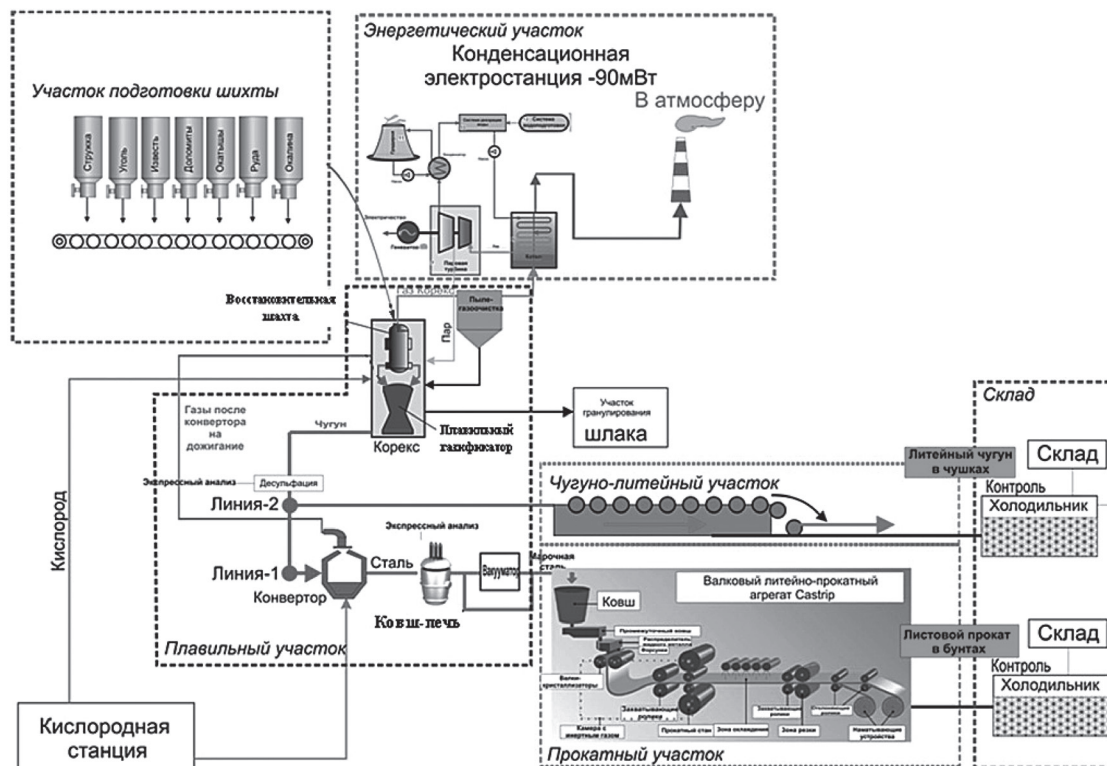


Рис. 5. Схема металлургического мини-завода

Для примера на рис. 5 приведена схема металлургического мини-завода, включающая установку Корекс, производительностью 800 тыс. т в год. За счет применения в качестве топлива углей практически любой калорийности, в том числе и бурых, в качестве сырья – железорудного концентрата, а также отходов металлургического производства в виде окалины, стружки, шлама себестоимость 1 т чугуна в конкретном случае составляет 200–250 долл. США (для сравнения стоимость импортируемого чугуна порядка 400 долл. США/т, плечо доставки – 1000–1500 км). Для дальнейшего производства стали в кислородном конвертере используется около 80% жидкого чугуна и 20% металлолома, что позволяет достичь значительной экономии топливно-энергетических ресурсов за счет использования кислорода. При использовании образующихся колошниковых газов (более 2 тыс. м³ на 1 т чугуна с теплотой сгорания 6,7–8,0 МДж/м³) дополнительно образуется ТЭР на уровне 150–200 тыс. т у.т.

Второе направление. К настоящему времени накоплен огромный опыт строительства и эксплуатации агрегатов доменного производства, которое постоянно совершенствуется и модернизируется. В качестве примера можно привести ввод в сентябре 2011 г. на Ново-Липецком металлургическом комбинате уникальной доменной печи «Россиянка», в которой воплощены современные технические решения, обеспечивающие высокопроизводительный, ресурсосберегающий, максимально автоматизированный и экологически безопасный процесс выплавки чугуна (рис. 6).

Преимущества строительства металлургического мини-завода при использовании доменного производства состоят в следующем: использование в качестве исходного материала железорудного материала (агломерата или офлюсованных окатышей), который в настоящее время имеется в достаточных количествах в странах СНГ (в частности, в Украине, России), Польше; экономия ТЭР за счет использования кислородного конвертера при получении стали; возможность создания мини-ТЭЦ (за счет применения доменного газа) мощностью 50–60 МВт (в эквиваленте 120 тыс. т у.т.) при годовой производительности доменной печи на уровне 1,0 млн. т в год; дополнительная экономия ТЭР при заливке жидкого чугуна с температурой перегрева 1350–1400 °С, что позволяет экономить 70–80 тыс. т у.т.

Третье направление. Основные положения сквозной технологии высшего технического уровня в рамках этого направления, на которых базируется концепция строительства современного металлургического мини-завода при использовании электросталеплавильных технологий, сформулированы следующим образом:

- использование в электросталеплавильном производстве сверхмощных дуговых сталеплавильных печей емкостью 160 т и более (рис. 7) с мощ-

• использование в электросталеплавильном производстве сверхмощных дуговых сталеплавильных печей емкостью 160 т и более (рис. 7) с мощ-

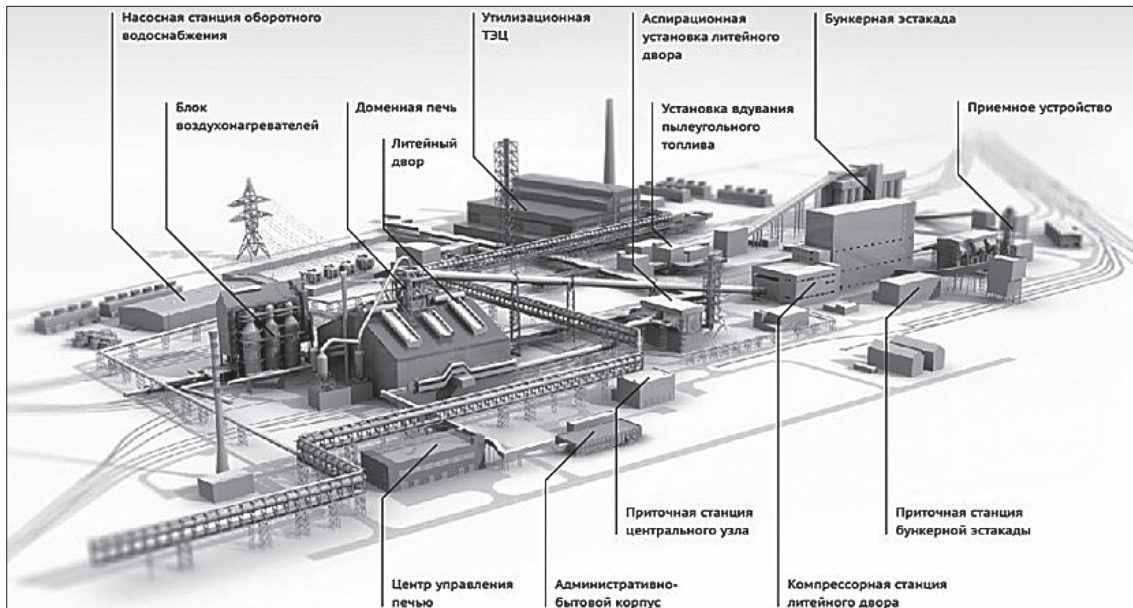


Рис. 6. Комплекс доменной печи № 7 НЛМК

ностью трансформатора 140–160 МВА (или 1 МВА мощности соответствует 1 т получаемой стали), обеспечивающих продолжительность плавки до 30 мин; применение так называемого жидкого старта («болота») в количестве 10–20%; работа электрических дуг со вспененным шлаком; выпуск металла из печи без шлака с помощью эркерного устройства; нагрев лома в период плавления комбинированными топливно-кислородными горелками; донная продувка ванны, снижение удельного расхода электроэнергии до 350–370 кВт·ч/т, а при использовании в завалке жидкого чугуна – на уровне 250 – 300 кВт·ч/т; обязательное включение в основную технологическую цепь процесса вне-агрегатной обработки стали (внепечная обработка (рис. 8), вакуумная обработка стали (рис. 9) и др.);

- использование высокопроизводительных машин непрерывного литья заготовок с учетом конфигурации сечения разливаемой заготовки и сортамента выпускаемой продукции (рис. 10), обеспечивающих скорость разлики мелкосортных заготовок (размером от 100 до 150 мм) на уровне 3,5–5,0 м/мин; среднесортных (200–250 мм) – 2,0–3,0 м/мин, крупносортных (более 250 мм) – 1,0–2,0 м/мин. Улучшение структуры и повышение свойств отливаемого металла, например для слябовых и сортовых машин при разливке крупносортных квадратных, прямоугольных, круглых заготовок, за счет применения устройств электромагнитного перемешивания, системы мягкого обжатия заготовки, применения комплекса средств автоматизированного управления процессами плавки и разлики, что в целом гарантирует соблюде-

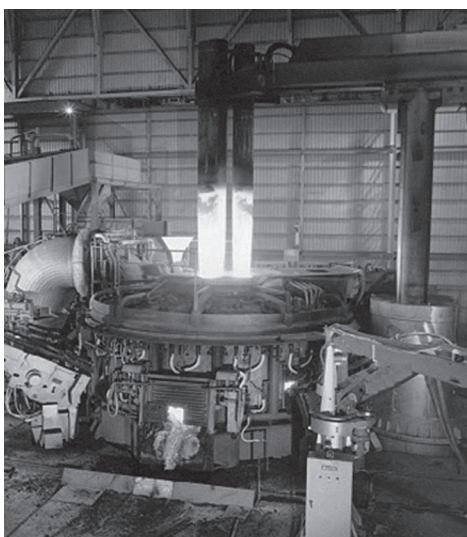


Рис. 7. Дуговая сталеплавильная печь (емкость – 160 т, мощность – 160 МВА, продолжительность плавки – 30 мин, расход электроэнергии – 350 кВт·ч/т)



Рис. 8. Установка «ковш-печь» (масса плавки – 140 т, мощность – 20 МВА, максимальная скорость нагрева – 5–6 град/мин)

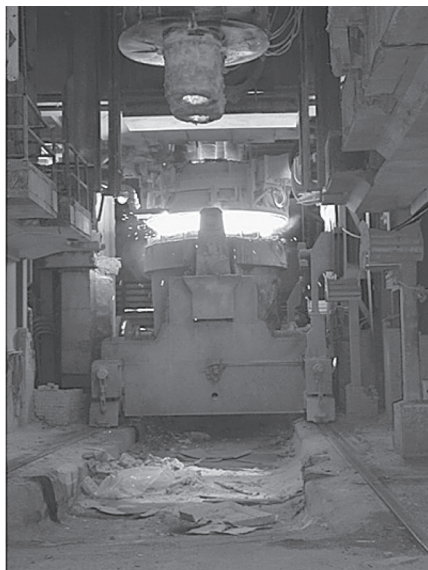


Рис. 9. Циркуляционный вакууматор

ние всех требуемых параметров процесса разли-
вки. В настоящее время имеется обширный опыт
строительства и эксплуатации МНЛЗ, накоплен-
ный белорусскими специалистами.

Концепция высшего технического уровня пред-
полагает, безусловно, сквозную технологию полу-
чения металлопродукции. В соответствии с этим
дополним концепцию основными положениями
в области прокатного производства, относящими-
ся ко всем трем направлениям строительства ме-
таллургических мини-заводов.

1. Использование самых последних достиже-
ний в области создания и эксплуатации газопечной
теплотехники, а именно: строительство современ-
ных нагревательных печей с механизированным
подом (шагающий под, шагающие балки (рис. 11),
вращающийся под); сводовое отопление плоско-
пламенными горелками и нижний подогрев метал-
ла с целью выравнивания температуры металла;
подогрев воздушного дутья до температуры 450–
550 °С, что в целом обеспечит значительное сни-

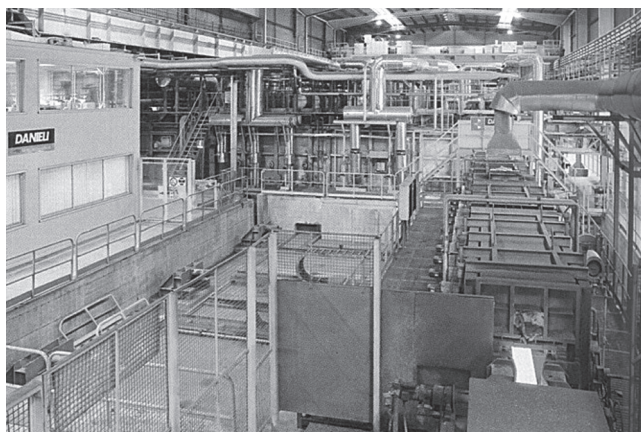


Рис. 11. Нагревательная печь с механизированным подом (шагающими балками)

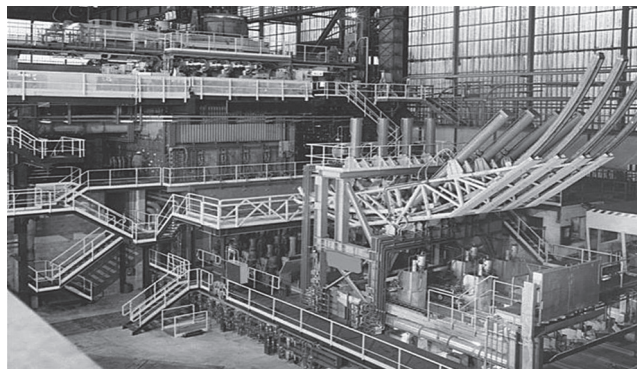


Рис. 10. Схема современной машины непрерывного литья заготовок (скорость разли-
вки – 4 м/мин, количество ру-
чьев – 8, радиус МНЛЗ – 8000 мм, металлургическая длина
МНЛЗ – 25 м, длина гильзы кристаллизатора – 900 мм)

жение потребления тепловой энергии (до 40 кг у.т./т
с холодного посада) и уменьшение окалинообра-
зования при ведении технологического процесса;
организация горячего посада заготовок при нагре-
ве металла с целью экономии топливно-энергети-
ческих ресурсов до 40–50% (20–25 кг у.т./т), обе-
спечение повышения качества нагреваемого ме-
талла и, как следствие, сокращение вредных вы-
бросов в окружающую среду.

2. Применение прокатных станов (рис. 12),
обеспечивающих прокатку строительных профи-
лей размером от 8 до 18 мм, средне- и высокоугле-
родистой катанки со скоростью 100–150 м/с, вклю-
чая использование слиттинг-процесса, организа-
цию технологии ускоренного охлаждения метал-
лопродукции, получение листового проката, ис-
пользование средств автоматизированного управ-
ления, переработку катанки в четвертых и пятых
переделах, например, при получении проволоки
и изделий из нее, металлокорда и др. При этом
структура прокатных станов, прежде всего совре-
менных проволочных станов, позволяет разме-
щать их компактно (с поворотом технологической
линии на 180°).



Рис. 12. Прокатный стан

Преимущества металлургического мини-завода по сравнению с другими производствами состоят в следующем.

1. Прежде всего, строительство современного металлургического мини-завода изначально предполагает реализацию нового мировоззрения с точки зрения наукоемкости, уровня и оснащенности технологий, использования топливно-энергетических ресурсов и достижения самого высокого экологического уровня эксплуатации оборудования по переделам:

- в условиях оборудования современного металлургического мини-завода энергоемкость стали должна находиться для сталеплавильного производства на уровне 180–200 кг у.т./т, в прокатном переделе (при нагреве металла в условиях прокатки на мелкосортных и среднесортных станах) – 40–45 кг у.т./т при холодном посаде металла и 20–30 кг у.т./т при горячем посаде;

- достижение высоких экологических показателей обеспечивается за счет исключения вредных и энергоемких переделов (агломерационный, коксовый, которые в обязательном порядке присутствуют на предприятиях с полным циклом), использования современных систем очистки уходящих газов и сбросов, высокого уровня автоматизации, что, в свою очередь, обеспечивает высокую управляемость технологическими процессами. Загрязнение воздушной среды для металлургического мини-завода снижается на 86%, а водной среды – на 76% по сравнению с предприятием полного цикла.

Технологии высшего технического уровня обеспечивают выбросы токсичных веществ NO_x , CO на уровне не более 150 мг/м³, что значительно ниже существующих норм ведущих металлургических стран как Япония, США, Германия и др.

2. Мобильность современных металлургических мини-заводов с электрометаллургическим циклом и технологией непрерывного литья стали и возможность их сооружения даже не в металлургических регионах, что будет способствовать интенсивному экономическому развитию даже тех регионов, которым традиционно несвойственна промышленная направленность. Это обстоятельство исключительно важно для создания рабочих мест на уровне 1500–2000 человек как для крупнонаселенных районов, так и для небольших городов с населением до 50–100 тыс. человек.

3. Компактность металлургического мини-завода (занимаемая площадь 300–500 тыс. м² или 30–50 га), высокая производительность труда, или иными словами, выработка металлопродукции на одного человека (в 2,0–2,5 раза выше, чем для

традиционных металлургических предприятий), более синхронная работа оборудования, высокий уровень подготовки рабочего и инженерно-технического персонала, низкие сроки строительства для мини-заводов (от 24 до 36 месяцев) обеспечивают окупаемость предприятия на уровне 4–5 лет.

4. Целесообразность строительства любого металлургического предприятия определяется наличием сырьевых и энергетических ресурсов в данном регионе или возможностью поставки сырья из других регионов. Учитывая ситуацию с возможностью оборота (поставок) сырья в первую очередь непосредственно железной дорогой, имеется возможность мобильно и рационально решать эти вопросы, а также оперативно реализовывать товарно-транспортные потоки по отгрузке готового металлопроката.

С точки зрения энергетических ресурсов следует заметить, что в будущем у нас будет иметь место значительный потенциал относительно дешевой электроэнергии за счет эксплуатации АЭС и других электрогенерирующих источников. Непрерывный режим работы основных (горячих) цехов металлургического мини-завода обеспечивает более высокую эффективность использования электроэнергии, особенно в период, когда потребность в электроэнергии резко снижается (например, в ночное время суток).

5. Важнейшим обстоятельством является использование современных методов подготовки и обучения рабочего и обслуживающего персонала и инженерно-технических специалистов применительно к металлургическому мини-заводу и заводу последнего поколения с изучением специальных курсов.

6. Отдельно следует остановиться на таком преимуществе металлургического мини-завода, приобретающем важнейшее значение для сегодняшних условий нестабильного развития рынка черных металлов, как малая инерционность при реагировании на изменение условий игры на рынках металлопродукции и возможность автономной работы независимо от инфраструктуры отрасли за счет эффективности самой схемы производства.

В качестве примера рассмотрен металлургический мини-завод по производству сортового проката (уголок, швеллер, арматура, балка, круг) производительностью 800 тыс. т в год. Основное технологическое оборудование включает (рис. 13) в себя: отделение подготовки металлошихты (металлолом, металлические окатыши, переделный чугун, горячеприкатываемое железо), сталеплавильное отделение (ДСП, участок внепечной об-

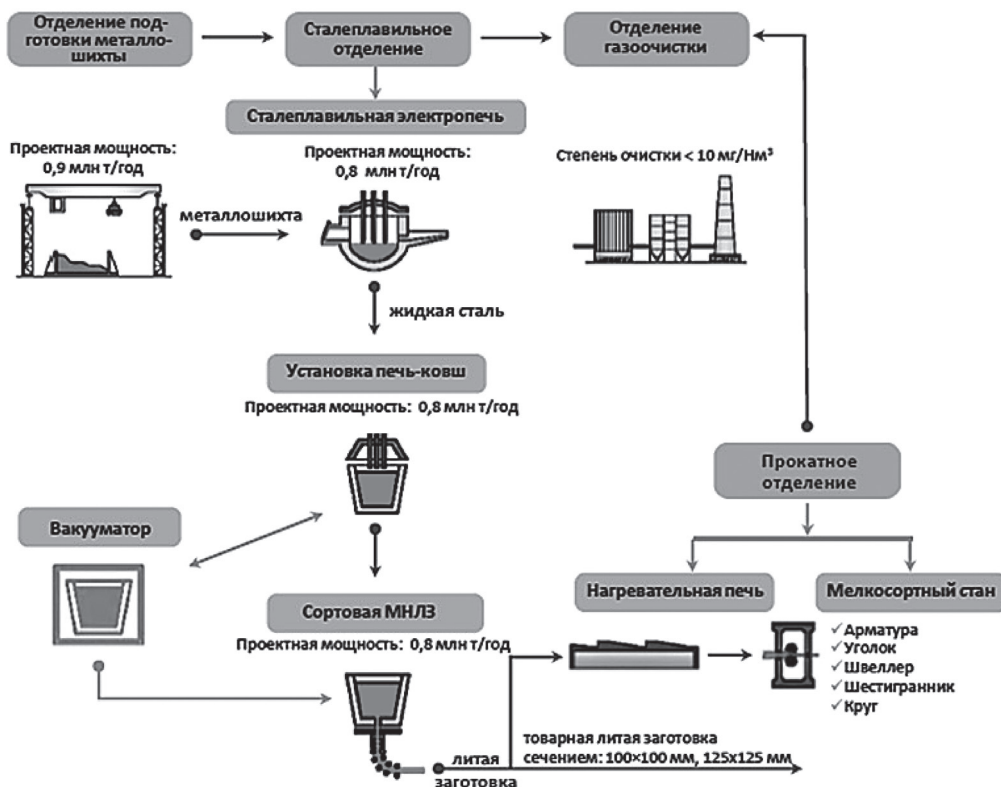


Рис. 13. Схема базового технологического оборудования металлургического мини-завода

работки, МНЛЗ), прокатное отделение (нагревательная печь, прокатный стан), отделение газоочистки.

Технико-экономические показатели сортопрокатного завода приведены в табл. 4.

Таблица 4. Основные технико-экономические показатели сортопрокатного завода

Производство продукции	800 000 т/год
Потребление ТЭР, ГДж/т	7,2–7,5
Удельное потребление ТЭР, кг у.т./т	245–255
Капитальные вложения, млн. долл. США	500
Капитальные вложения с учетом инфраструктуры, млн. долл. США	600
Выручка от реализации продукции, млн. долл. США	600
Чистая прибыль, млн. долл. США	120
Отчисления в региональный бюджет, млн. долл. США	40
Окупаемость, лет	4–5

Актуальность строительства металлургических мини-заводов, помимо их технических, экологических и социальных преимуществ, сегодня также обусловлена тем, что большинство участников рынка ожидают дальнейшего роста цен на металлопродукцию (по оценкам экспертов, она может превысить 1000 долл. США/т), а также наличием значительного количества ниш при реализации металлопродукции при варьировании цены от 5 до 10%.

Выводы

1. Сегодня в глобальной металлургии наибольшее распространение получили мини-заводы последнего поколения с приведенной выше технологической схемой производства стали и проката.

2. Само понятие «металлургический мини-завод» предопределяет целесообразность его строительства в пределах местонахождения основного потребителя металлопродукции, а также и в пределах основного источника электрической и тепловой энергии.

3. Современные металлургические мини-заводы предусматривают, прежде всего, высокоэффективные энергетические и теплотехнологические процессы, используемые им непосредственно, и незначительные сроки окупаемости с момента ввода в эксплуатацию. Целесообразно и эффективно в качестве дополнительной инфраструктуры использование комплексов по производству жидкого чугуна, что позволяет значительно сократить потребление ТЭР и оперативно решать вопросы стабилизации материально-технической базы. При этом необходимо научно-техническому и производственному персоналу, разрабатывающему современные конструкции металлургических агрегатов, акцентировать внимание на вопросах создания современных металлургических технологий в области бескоксовой металлургии (процессы Мидрекс, Корекс, производство горячеприкатанного железа).

Литература

1. Аналитический бюллетень «Металлургия: Тенденции и прогнозы. Выпуск № 1. Итоги 2010 г.». Агентство «РИА Аналитика». М., 2011.
2. Смирнов А. Н. Metallургические мини-заводы / А. Н. Смирнов, В. Н. Сафонов, Л. В. Дорохова, А. Ю. Цупрун. Донецк: Горд-Пресс, 2005.
3. Тимошпольский В. И. Теплотехнология металлургических мини-заводов / В. И. Тимошпольский, Ю. В. Феоктистов, А. Б. Стеблов и др. Мн.: Навука і тэхніка, 1992.
4. Тимошпольский В. И. Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. Мн.: Навука і тэхніка, 1995.
5. Горбанев А. А. Теоретические и технологические основы высокоскоростной прокатки катанки / А. А. Горбанев, С. М. Жучков, В. В. Филиппов и др. Мн.: Выш. шк., 2003.
6. Тимошпольский В. И. Производство высокоуглеродистой катанки на металлургических агрегатах высшего технического уровня / В. И. Тимошпольский, Н. В. Андрианов, С. М. Жучков и др. Мн.: Беларуская навука, 2004.
7. Тимошпольский В. И. Развитие металлургического комплекса на базе промышленного освоения железных руд (для использования в Республике Беларусь. В порядке обсуждения) // Литье и металлургия. 2007. № 2. С. 6–17.