

УДК 669.187.012.7

*А.А. Уманский, Н.А. Козырев, Л.В. Думова***Сибирский государственный индустриальный университет****АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ СОСТАВА МЕТАЛЛОШИХТЫ
ЭЛЕКТРОПЛАВКИ С ОСНОВНЫМИ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ
ПОКАЗАТЕЛЯМИ ВЫПЛАВКИ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ**

В настоящее время в мировой металлургии основная масса стали рельсовых марок выплавляется в кислородных конвертерах. В частности, кислородно-конвертерная рельсовая сталь производится в США, Японии, Австрии, Франции, Италии, Польше. Известно о промышленном производстве стали в дуговых электропечах в Канаде, однако завод в настоящее время закрыт.

В отечественной металлургии выплавку рельсовой стали в кислородных конвертерах осуществляют на АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат («НТМК») и ПАО «Челябинский металлургический комбинат («ЧМК» – входит в состав компании «Мечел»), выплавку стали рельсовых марок в дуговых сталеплавильных печах – на АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» («ЕВРАЗ ЗСМК»).

До 1995 г. в РФ выплавку 100 % рельсовой стали осуществляли в мартеновских 400-тонных печах скрапрудным процессом. Переход на выплавку стали в кислородных конвертерах осуществлен на «НТМК» в 1995 г., выплавка стали в дуговых электропечах освоена на Новокузнецком металлургическом комбинате (в настоящее время входит в состав «ЕВРАЗ ЗСМК») с 2000 г. В 2014 г. в связи с запуском в эксплуатацию нового рельсобалочного стана на «ЧМК» освоена выплавка рельсовых сталей в кислородных конвертерах.

Основной причиной малой распространенности производства рельсов из электростали является целевая направленность строительства современных электросталеплавильных цехов с печами большой емкости на утилизацию региональных ресурсов скрапа и обеспечение регионов металлопродукцией промышленного и строительного назначения. При этом достигаются достаточно высокая экономическая эффективность и конкурентоспособность. Кроме того, при производстве ряда марок стали (как правило, подвергаемых термообработ-

ке), в том числе и рельсовых, возникает проблема обеспечения низкого и стабильного уровня содержания в стали примесей остаточных элементов (хрома, никеля, меди), которая не может быть разрешена без значительных дополнительных затрат или резкого ограничения сырьевой базы.

Тем не менее, производство рельсов из электростали представляется перспективным по ряду причин [1, 2]:

- электродуговая печь является универсальным агрегатом, позволяющим с высокой экономичностью проводить широкий спектр технологических операций, использовать для производства стали шихтовые материалы различного происхождения. Работа дуговой сталеплавильной печи хорошо сочетается с агрегатами внепечной обработки и установками непрерывной разливки стали;

- более широкие технологические возможности электродуговых печей позволяют организовать производство рельсов улучшенного металлургического качества, в том числе предназначенных для эксплуатации в особо сложных условиях.

Фактически дуговая электросталеплавильная печь является более гибким агрегатом по сравнению с кислородным конвертером по следующим параметрам [3, 4]:

- обеспечение заданной скорости расплавления, нагрева, обезуглероживания, гомогенизации по температуре и химическому составу;

- возможности легирования (в том числе прямого легирования стали) металлического расплава;

- обеспечение заданной скорости расплавления шлакообразующих, формирования однородного, обладающего высокой рафинирующей способностью шлака для проведения дефосфорации в печи, а при выпуске из печи и десульфурации – расплава шлака, способствующего удалению неметаллических включений и дегазации стали.

Следует отметить, что замещение части лома чугуном продиктовано, прежде всего, необходимостью выполнения требований по концентрации примесей цветных металлов. При этом технико-экономическая эффективность такой замены не всегда очевидна.

В частности, технология использования чугуна в электроплавке имеет такие технологические и экономические недостатки, как [5, 6]:

- повышение кратности шлака из-за высокого содержания кремния в чугуне, что, в свою очередь, обуславливает повышение затрат на утилизацию шлака, повышение угара ферросплавов;
- увеличение расхода извести для получения требуемой основности шлака, а также увеличение тепловых потерь со шлаком;
- увеличение расхода марганецсодержащих ферросплавов вследствие меньшего содержания марганца в чугуне по сравнению с металлоломом;
- увеличение затрат на металлошихту из-за более высокой стоимости чугуна по сравнению с металлоломом;
- повышение расхода окислителей вследствие необходимости удаления из расплава вносимого чугуном углерода.

В случае использования жидкого чугуна также дополнительно имеют место следующие недостатки [7 – 9]:

- разрушение футеровки печи при падении струи чугуна со значительной высоты в печь;
- возможность возникновения дополнительных аварийных ситуаций, связанных с нерегламентированными режимами заливки чугуна в печь;
- необходимость дополнительных инвестиций для дооборудования печей;
- возможность спелеобразования в случае пониженной температуры заливаемого чугуна, что приводит к отклонениям в работе электроустановок.

Замена части лома чугуном в металлошихте позволяет добиться и ряда существенных преимуществ:

- уменьшить расход топлива (природного газа);
- снизить расход науглероживателей (кокса);
- сократить затраты на подготовку металлолома к плавке;
- уменьшить концентрацию азота в стали вследствие интенсификации окислительного периода и общего уменьшения продолжительности плавки;
- снизить расход огнеупорных изделий за счет уменьшения перепадов температур и от-

сутствия механических разрушений футеровки при загрузке тяжеловесной металлошихты;

- уменьшить загрязненность стали экзогенными неметаллическими включениями.

В целом оценку технико-экономической эффективности использования чугуна в металлозавалке дуговых электропечей и выбор оптимального расхода чугуна следует проводить для условий конкретного агрегата и с учетом текущего уровня цен на материалы и энергоносители.

Данный подход реализован при исследовании влияния состава металлошихты на технико-экономические показатели работы электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» [10, 11]. Следует отметить, что в период с 2000 г. по 2010 г. выплавку стали рельсовых марок в указанном цехе осуществляли с использованием жидкого чугуна, с 2010 г. в связи с закрытием собственного доменного производства в металлошихте используется твердый чугун внешних поставщиков.

Проведено статистическое исследование влияния соотношения количества лома и чугуна в металлозавалке на технико-экономические показатели производства рельсовой стали в периоды, характеризующиеся следующими технологическими схемами производства:

1 – выплавка в дуговой сталеплавильной печи с использованием 30 – 60 % жидкого чугуна с последующей внепечной обработкой стали на агрегате «ковш–печь» и разливкой на МНЛЗ в заготовки сечением 300×330 мм (2007 г.);

2 – выплавка в дуговой сталеплавильной печи с использованием 20 – 50 % твердого (чугунного) чугуна, последовательная внепечная обработка на двух агрегатах «ковш–печь» и вакууматоре и разливка на реконструированной МНЛЗ в заготовки сечением 300×360 мм (2016 г.).

Исследовали влияние состава металлозавалки на следующие показатели работы электропечей при выплавке рельсовой стали: удельный расход электроэнергии, кислорода, извести, содержание марганца и кремния на выпуске из печи (характеризует расход ферросплавов), безвозвратные потери металла (угар), длительность плавки.

В качестве базы для исследования использовали массив из 1000 плавов рельсовой стали марок Э76Ф (2007 г.) и Э76ХФ (2016 г.). Выбор указанных марок стали обусловлен их наибольшей долей в сортаменте рассматриваемого цеха.

В результате проведенного анализа установлено значимое влияние состава металлошихты на следующие параметры: удельный расход электроэнергии и кислорода, содержа-

ние марганца на выпуске из печи, длительность плавки.

По полученным данным при увеличении доли как жидкого, так и твердого чугуна в металлозавалке удельный расход электроэнергии линейно уменьшается (рис. 1).

Изменение расхода жидкого чугуна несколько более значительно сказывается на расходе электроэнергии по сравнению с твердым чугуном. Данное различие обусловлено повышенным теплосодержанием жидкого чугуна, что обуславливает сокращение периода плавления. Более низкая температура плавления твердого чугуна по сравнению с металлическим ломом также приводит к уменьшению длительности плавления, которое, однако, не

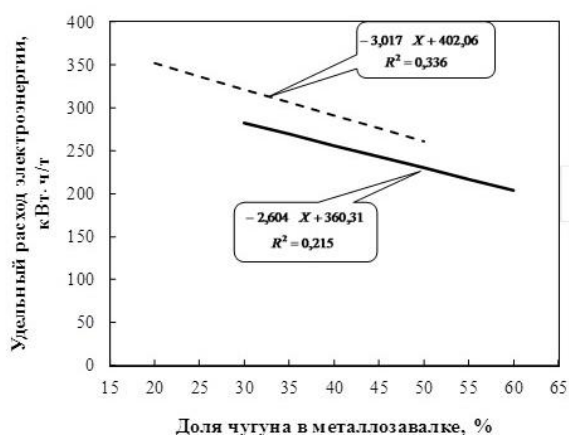


Рис. 1. Зависимость удельного расхода электроэнергии от доли чугуна в металлозавалке:

— жидкий чугун; - - - - - твердый чугун

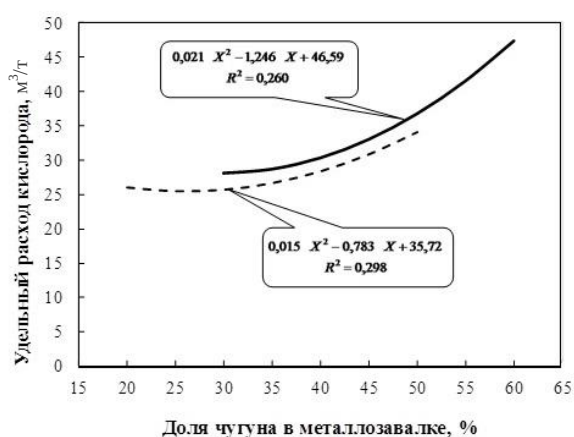


Рис. 2. Зависимость удельного расхода кислорода от доли чугуна в металлозавалке:

— жидкий чугун; - - - - - твердый чугун

столь значительно, как в случае применения жидкого чугуна. Удельный расход кислорода при повышении доли чугуна в металлозавалке возрастает по параболическому закону (рис. 2)

независимо от агрегатного состояния используемого чугуна. Увеличенный расход кислорода обусловлен необходимостью окисления дополнительного вносимого чугуном углерода, а параболический характер полученной зависимости свидетельствует об увеличении интенсивности продувки кислородом для снижения продолжительности окислительного периода и плавки в целом.

Полученные результаты свидетельствуют о снижении содержания марганца на выпуске из печи при повышении расхода чугуна на плавку (рис. 3), что объясняется пониженным содержанием марганца в чугуне относительно лома и повышенным окислением марганца за счет увеличения продолжительности и интенсивности продувки кислородом.

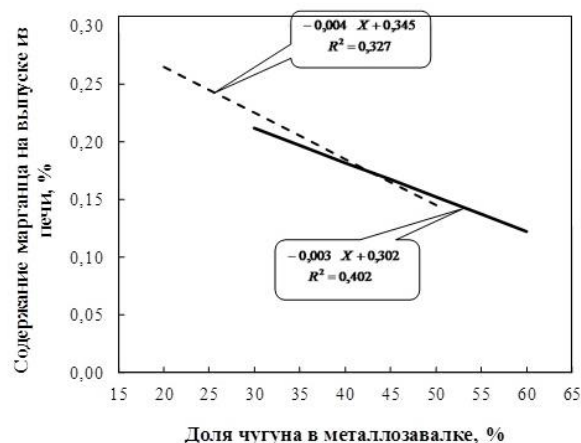


Рис. 3. Зависимость содержания марганца на выпуске из печи от доли чугуна в металлозавалке:

— жидкий чугун; - - - - - твердый чугун

Зависимость длительности плавки от соотношения компонентов шихты в металлозавалке свидетельствует о наличии выраженного минимума на рассматриваемом интервале изменения расхода чугуна (рис. 4).

При этом указанный минимум при использовании жидкого чугуна находится в интервале 35 – 40 %, а при использовании твердого чугуна – 30 – 35 %. Такой характер зависимости, очевидно, обусловлен разнонаправленным влиянием увеличения расхода чугуна на продолжительность периодов плавки (период плавления, окислительный период, количество подвалок металлолома) и нелинейным изменением продолжительности самих периодов. Так, при увеличении расхода чугуна происходит снижение продолжительности периода плавления при одновременном увеличении длительности окислительного периода. При этом, как показано выше, увеличение расхода жидкого чугуна оказывает более сильное влияние на ускорение расплавления шихты по сравне-

нию с твердым чугуном. Также повышение расхода чугуна приводит к снижению или полному отказу от подвалок металлолома, что, естественно, уменьшает продолжительность плавки.

На основании полученных зависимостей построена статистическая модель влияния состава металлошихты на технико-экономические показатели работы ЭСПЦ при выплавке рельсовой стали. В качестве параметров оптимизации выбрали суммарные затраты по статьям себестоимости, зависящим от состава металлошихты, и производительность цеха по годным непрерывнолитым заготовкам.

В качестве формирующих суммарные затраты по зависящим от состава металлошихты статьям себестоимости компонентов выступи-

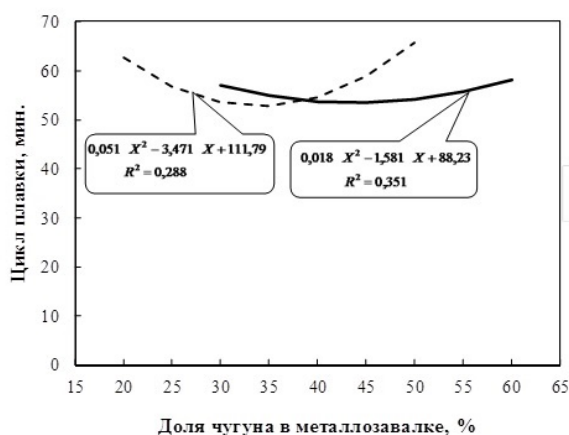


Рис. 4. Зависимость длительности электроплавки от доли чугуна в металлозапалке:

— жидкий чугун; - - - - - твердый чугун

ли затраты на шихтовые материалы (чугун и лом), затраты на электроэнергию, кислород, ферросплавы:

$$Z_{\text{сум}} = (P_{\text{чуг}} \cdot \Pi_{\text{чуг}} + P_{\text{лом}} \cdot \Pi_{\text{лом}} + P_{\text{эл.эн.}} \cdot \Pi_{\text{эл.эн.}} + P_{\text{кисл.}} \cdot \Pi_{\text{кисл.}} + P_{\text{фер}} \cdot \Pi_{\text{фер}}), \quad (1)$$

где $P_{\text{чуг}}$, $P_{\text{лом}}$, $P_{\text{эл.эн.}}$, $P_{\text{кисл.}}$, $P_{\text{фер}}$ – удельные расходы чугуна, лома, электроэнергии, кислорода и ферросплавов соответственно; $\Pi_{\text{чуг}}$, $\Pi_{\text{лом}}$, $\Pi_{\text{эл.эн.}}$, $\Pi_{\text{кисл.}}$, $\Pi_{\text{фер}}$ – цена чугуна, лома, электроэнергии, кислорода и ферросплавов соответственно.

Расход марганецсодержащих ферросплавов обратно пропорционален содержанию марганца на выпуске из печи. С учетом содержания марганца в ферросплаве и с учетом угара марганца удельный расход ферросплавов определяется по следующей формуле:

$$P_{\text{фер}} = \frac{10(C_{\text{гот}} - C_{\text{вып}})}{C_{\text{ф}}(100 - Y)}, \quad \text{т/т}, \quad (2)$$

где $C_{\text{гот}}$ – содержание марганца в готовой стали, %; $C_{\text{вып}}$ – содержание марганца на выпуске из печи, %; $C_{\text{ф}}$ – содержание марганца в ферросплаве, %; Y – угар марганца, %.

Производительность цеха определяли по формуле:

$$\Pi_{\text{заг}} = \frac{1440M}{100T} B\Phi, \quad (3)$$

где M – масса металлозапалки, т; B – выход годного, %; Φ – фонд времени работы цеха, сут/год; T – цикл плавки, мин.

Модель реализована в программе «Excel», в качестве изменяющихся исходных данных использовали цены на чугун, металлический лом, электроэнергию, кислород и марганецсодержащие ферросплавы, а также такие параметры, как средняя масса металлозапалки, выход годного, фактическое время работы цеха, среднее содержание марганца в ферросплавах, угар марганца при раскислении и легировании.

После ввода исходных данных программа рассчитывает прогнозные значения расходов электроэнергии, кислорода, содержания марганца на выпуске из печи и длительности плавки по уравнениям регрессии (рис. 1 – 4). Затем проводится расчет прогнозируемой величины суммарных затрат по статьям, зависящим от соотношения количества чугуна и лома в металлозапалке и прогнозируемой производительности цеха. Полученные данные выводятся на экран в виде графиков. На рис. 5 в качестве примера представлены графики изменения затрат по статьям, зависящим от доли чугуна в металлозапалке, при различном соотношении цен на чугун и металлолом;

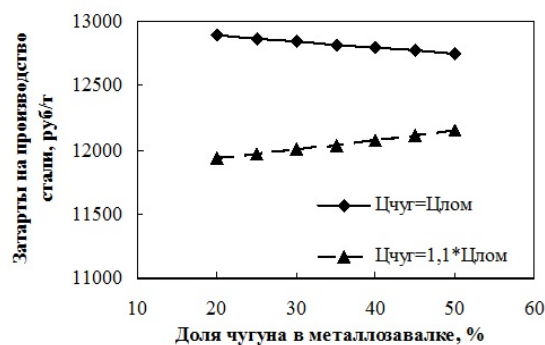


Рис. 5. Зависимость затрат на производство стали от доли чугуна в металлозапалке

на рис. 6 приведен график изменения прогнозируемой производительности цеха при варьировании доли чугуна в металлозавалке.

Выводы. Использование разработанной модели позволяет выработать обоснованные рекомендации по оптимальной доле чугуна в металлозавалке для текущего уровня цен на используемые при электроплавке материалы и энергоносители, а также с учетом изменения производительности цеха.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Милуц В.Г., Бочарников А.Ф., Куликов В.В. Опыт разработки технологии выплавки стали в 100-тонных дуговых печах с использованием жидкого чугуна // *Сталь*. 1997. № 8. С. 30 – 32.
2. Катунин А.И., Годик Л.А., Обшаров М.В., Козырев Н.А., Тиммерман Н.Н. Применение жидкого чугуна в дуговых электропечах // *Металлург*. 2000. № 6. С. 32.
3. Липухин Ю.В., Молчанов О.Е., Балдаев Б.Я. Опыт выплавки стали в 100-т дуговых электропечах с использованием в шихте жидкого чугуна // *Сталь*. 1997. № 7. С. 26 – 27.
4. Годик Л.А., Козырев Н.А., Данилов А.П., Захарова Т.П., Тиммерман Н.Н. Использование жидкого чугуна при выплавке стали в дуговых электропечах // *Электрометаллургия*. 2002. № 1. С. 9 – 14.
5. Уйманов В.А., Балдаев Б.Я., Шурыгин А.В., Громов Г.И. Опыт выплавки стали в 100-тонных дуговых электропечах АО «Северсталь» с использованием в шихте жидкого чугуна. – В кн.: Труды четвертого конгресса сталеплавильщиков. – М.: Черметинформация, 1997. С. 148, 149.
6. Хмиров В.П., Гордиенко М.С., Махницкий В.А. Производство кислородно-конвертерной рельсовой стали // *Металлург*. 1987. № 3. С. 20 – 21.
7. Катунин А.И., Годик Л.А., Козырев Н.А. Разработка технологии выплавки стали в электропечах с использованием жидкого чугуна // *Сталь*. 2000. № 5. С. 33 – 35.
8. Катунин А.И., Годик Л.А., Козырев Н.А., Тиммерман Н.Н., Сычев П.Е. Экономические аспекты использования жидкого чугуна // *Сталь*. 2001. № 7. С. 26, 27.

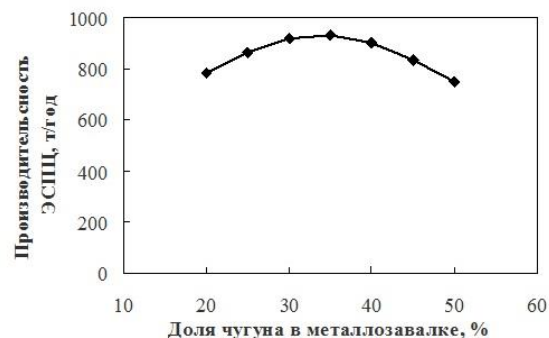


Рис. 6. Зависимость прогнозируемой производительности ЭСПЦ при различной доле чугуна в металлошихте

9. Катунин А.И., Козырев Н.А., Данилов А.П., Негода А.В., Шуклин А.В. Экономические и технологические аспекты использования жидкого чугуна при выплавке стали в дуговых электропечах // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2001. № 4. С. 24 – 26.
10. Айзатулов Р.С., Уманский А.А., Чернышева Н.А. Статистический анализ влияния состава металлической шихты на основные технико-экономические показатели работы электросталеплавильного цеха ОАО «НКМК» // *Вестник горно-металлургической секции российской академии естественных наук. Отделение металлургии*. 2009. Вып. 23. С. 39 – 46.
11. Думова Л.В., Уманский А.А. Исследование влияния параметров металлозавалки на технико-экономические показатели производства электростали. – В сб.: Роль технических наук в развитии общества. Кемерово: Западно-Сибирский научный центр, 2017. С. 131 – 134.

© 2017 г. А.А. Уманский,
Н.А. Козырев, Л.В. Думова
Поступила 30 августа 2017 г.