ISSN: 0368–0797. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Том 61. № 11. С. 876 – 883.
© 2018. *Уманский А.А., Думова Л.В.*

УДК 669.187.012.7+621.771.014

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЫПЛАВКИ РЕЛЬСОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАЛИ НА КАЧЕСТВО РЕЛЬСОВОЙ ПРОДУКЦИИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЕЕ ПРОИЗВОДСТВА*

Уманский А.А., *к.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов, директор Центра коллективного пользования «Материаловедение»* (umanskii@bk.ru)
Думова Л.В., *магистрант кафедры металлургии черных металлов* (doumova@bk.ru)

Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Проведенный анализ литературных и производственных данных показал, что, несмотря на существенное повышение качества отечественной рельсовой продукции, достигнутое в последнее десятилетие за счет коренного технического перевооружения рельсовых производств, имеет место проблема повышенной отбраковки рельсов по дефектам поверхности. На основании исследований влияния химического состава рельсовой электростали на качество готовых рельсов производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» установлено значимое влияние повышения содержания меди в интервале 0,07 – 0,15 % и серы в диапазоне 0,006 – 0,011 % в стали Э76ХФ на увеличение отбраковки рельсов по поверхностным дефектам. Раскрыт механизм влияния концентрации указанных элементов в рельсовой стали на качество готовых рельсов. Показано определяющее влияние соотношения чугуна и лома в металлошихте на содержание меди и серы в рельсовой стали – повышение доли чугуна в металлошихте в пределах от 20 до 50 % способствует снижению концентрации меди и повышению содержания серы. С целью обоснования оптимального состава металлошихты для выплавки рельсовой электростали с учетом взаимосвязи качества рельсовой продукции и технико-экономических показателей ее производства проведено исследование влияния соотношения чугуна (в жидком и твердом состояниях) и лома в металлозавалке на основные показатели работы электропечей. В результате установлено, что при увеличении доли как жидкого, так и твердого чугуна в металлозавалке происходит линейное снижение удельного расхода электроэнергии, повышение удельного расхода кислорода по параболическому закону и линейное снижение содержания марганца на выпуске из печи. Полученные зависимости длительности плавки от соотношения компонентов шихты в металлозавалке свидетельствует о наличии выраженного минимума, находящегося при использовании жидкого чугуна в интервале 35 – 40 %, а при использовании твердого чугуна – в интервале 30 – 35 %. На основании полученных уравнений регрессии построена статистическая модель влияния состава металлошихты на технико-экономические показатели работы электросталеплавильного цеха при выплавке рельсовой стали, в которой в качестве параметров оптимизации выступают суммарные затраты по статьям себестоимости, зависящим от состава металлошихты, и производительность цеха по годным непрерывнолитым заготовкам. Применение полученной модели позволяет выработать обоснованные рекомендации по оптимальной доле чугуна в металлозавалке для текущего уровня цен на используемые при электроплавке материалы и энергоносители с учетом изменения производительности цеха.

Ключевые слова: рельсовая электросталь, железнодорожные рельсы, поверхностные дефекты, металлошихта, примеси цветных металлов, сульфиды, технико-экономические показатели.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-11-876-883

В настоящее время Россия занимает третье место в мире по протяженности железных дорог, что обусловлено географическими особенностями государства и традиционно сложившейся транспортной инфраструктурой. Обеспечение отечественного путевого хозяйства высококачественными рельсами собственного производства является одной из основных задач в рамках реализации концепции импортозамещения.

Проведенная в последнее десятилетие коренная реконструкция рельсового производства в России позволила существенно повысить качество отечественной рельсовой продукции, однако при этом отмечаются существенные проблемы, связанные, в частности, с высоким уровнем отбраковки рельсов по дефектам поверхности [1, 2]. Имеющийся опыт совершенствования режимов прокатки железнодорожных рельсов в условиях как отечественных [3 – 10], так и зарубежных [11 – 14] современных универсальных рельсопрокатных станов свидетельствует о возможности снижения остроты указанной проблемы. Однако сложность процессов формирования качества рельсовой продукции обуславливает необходимость учета влияния параметров не только прокатного, но и сталеплавильного переделов.

Обеспечение конкурентоспособности отечественных железнодорожных рельсов на российском и зарубежном рынках напрямую определяется себестоимостью их производства, что приводит к необходимости

* Работа выполнена в СибГИУ в рамках базовой части Государственного задания Минобрнауки РФ № 11.6365.2017/8.9.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Материаловедение» СибГИУ.

учитывать взаимосвязь повышения качественных показателей рельсов с изменением уровня производственных затрат. Таким образом, выбранное направление исследований по анализу комплексного влияния технологических параметров производства рельсовой электростали на ее качественные показатели и величину производственных затрат является актуальным.

Исследования влияния параметров производства рельсовой стали на качество железнодорожных рельсов проводили методом пассивного эксперимента с использованием множественного регрессионного анализа случайного массива плавок текущего производства электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

В качестве объекта исследований выбрали 100 плавок стали Э76ХФ, произведенные в 2016 г. в электросталеплавильном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Технология производства рассматриваемых плавок включала в себя выплавку в дуговой сталеплавильной печи с последующей внепечной обработкой на двух установках ковш-печь и вакууматоре, а также разливку на блюмовой МНЛЗ на заготовки сечением 300×360 мм. Полученные заготовки доставлялись в рельсобалочный цех, где проводился их нагрев, прокатка и термическая обработка с получением готовых рельсов типа Р65.

Анализировали влияние концентрации следующих химических элементов в готовой стали Э76ХФ на отбраковку готовых рельсов по дефектам поверхности: углерод, кремний, марганец, хром, фосфор, сера, никель, медь, алюминий, титан, ванадий, азот. Диапазон изменения содержания перечисленных элементов на анализируемой выборке плавок в сопоставлении с требованиями ГОСТ Р 51685 – 2013 представлен в таблице.

По полученным данным в представленном диапазоне изменения концентраций элементов значимое влияние на отбраковку рельсов по дефектам поверхности оказывает содержание меди и серы в готовой стали.

Полученное в результате проведенного анализа уравнение регрессии в натуральном масштабе имеет следующий вид:

$$Y = -4{,}73 + 28{,}91[\mathrm{Cu}] + 386{,}09[\mathrm{S}], \qquad (1)$$

где Y – отбраковка рельсов по дефектам поверхности, %; [Cu] и [S] – содержание меди и серы в готовой стали соответственно, %.

Повышение концентрации меди с 0,07 до 0,15 % способствует увеличению отбраковки рельсов по поверхностным дефектам (рис. 1, *а*). Механизм отрицательного влияния меди на качество рельсов заключается в следующем: при кристаллизации медь, как и ряд других примесей цветных металлов, имеет свойство концентрироваться в межзеренном пространстве. Ситуация усугубляется склонностью меди к диффузии, что приводит к значительному увеличению ее концентрации в приповерхностных слоях «выпотевание меди» [15 – 17]. Поскольку температура плавления меди (1083 °С) ниже температуры начала прокатки рельсов, то находящаяся в жидком состоянии медь распространяется в межзеренных границах, ослабляет связь между зернами и охрупчивает металл. В результате возникает так называемая «поверхностная красноломкость», приводящая к образованию поверхностных дефектов при прокатке.

Увеличение содержания серы в готовой стали с 0,006 до 0,011 % приводит к повышению брака по дефектам поверхности (рис. 1, *б*). Механизм отрицательного влияния серы на качество стальных изделий обусловлен ее практически неограниченной растворимостью в жидкой стали и очень малой растворимостью в твер-

Диапазон концентрации химических элементов в стали Э76ХФ

The range of concentration of chemical elements in E76KhF steel

Элемент	Диапазон изменения содержания элемента в стали, %	Требования ГОСТ Р 51685 – 2013 по содержанию элемента в стали
C	0,750 – 0,792	0,71 – 0,82
Si	0,536 – 0,588	0,25 – 0,60
Mn	0,773 – 1,160	0,75 – 1,25
Cr	0,370 – 0,409	0,20 – 0,80
P	0,007 – 0,019	≤ 0,020
S	0,006 – 0,011	≤ 0,020
Ni	0,042 – 0,082	≤ 0,150
Cu	0,072 – 0,150	≤ 0,200
Al	0,003 – 0,004	≤ 0,004
Ti	0,003 – 0,004	≤ 0,010
V	0,038 – 0,042	0,03 – 0,15
N	0,006 – 0,008	–

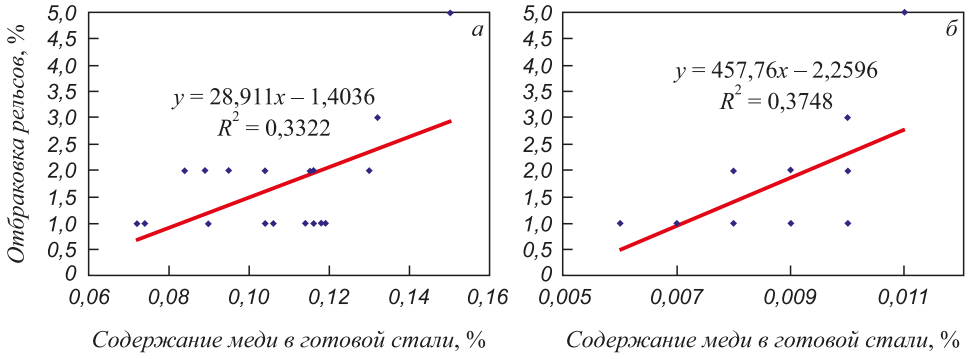

Рис. 1. Зависимость отбраковки рельсов по дефектам поверхности от содержания меди (*а*) и серы (*б*) в стали Э76ХФ

Fig. 1. Dependence of rails rejection caused by surface defects on copper (*a*) and sulfur (*б*) content in E76KhF steel

дом состоянии [18, 19]. Для малых концентраций серы, предельная растворимость серы в железе при температуре 1365 °С составляет 0,05 %, а при 1000 °С – 0,013 %. В α-железе растворимость серы ничтожна. Вследствие понижения растворимости во время кристаллизации стали и ее охлаждения сера выделяется из раствора в виде включений сульфидов FeS или оксисульфидов FeS – FeO. При этом превышение концентрации серы в областях по границам дендритов над среднеплавочным значением может достигать значительных величин – по данным работы [20] до 2000 раз.

При температурах прокатки (850 – 1200 °С) сера в стали вызывает понижение технологической пластичности, называемое «красноломкостью» (потеря пластичности при температуре красного каления). Красноломкость проявляется в образовании рванин и трещин в процессе прокатки, причиной ее возникновения является оплавление оксисульфидов и сульфидов по границам зерен, вызывающее разрушение металла. В соответствии с диаграммой Fe – S этот факт может иметь место при содержании серы в стали более 0,01 %, т. е. тогда, когда оно выше предела растворимости в γ-железе.

Степень влияния серы на свойства стали зависит от характера сульфидных включений и их расположения в металле, что определяется воздействием некоторых сульфидообразующих элементов, вводимых в сталь для раскисления [21]. При раскислении стали марганцем и кремнием без алюминия или с небольшим (до 0,006 %) его количеством образуются сульфиды и преимущественно оксисульфиды в виде обособленных, беспорядочно разбросанных обычно крупных глобулей (I тип включений). При более полном раскислении алюминием сульфидные включения выпадают в виде цепочек мелких глобулей или пленок (II тип включений). Критическое содержание алюминия, при котором образуются включения второго типа, составляет примерно 0,005 – 0,020 % в средне- и высокоуглеродистой стали. Дальнейшее увеличение количества вводимого в сталь алюминия приводит к образованию включений III типа, относительно крупных, обычно неправильной формы, беспорядочно расположенных в металле. Эти включения состоят из сульфидов алюминия, марганца и железа.

Наиболее вредное влияние на механические свойства стали и склонность к красноломкости сера оказывает при образовании включений II типа. Влияние это меньше при образовании включений III типа и еще меньше при образовании включений I типа. Особое влияние на склонность к возникновению красноломкости оказывает марганец. В стали, не содержащей марганца, красноломкость возникает при очень малой концентрации серы, критическая величина которой зависит от состава металла и условий деформации.

Исходя из химического состава анализируемой стали (содержание алюминия 0,003 – 0,004 %), основную долю составляют включения I типа, т. е. оксисульфиды. Однако проведенные металлографические исследования показали наличие в готовых рельсах также и включений II типа (рис. 2), являющихся наиболее опасными с точки зрения образования поверхностных дефектов.

Анализ зависимостей содержания меди и серы в рельсовой стали от технологических параметров про-

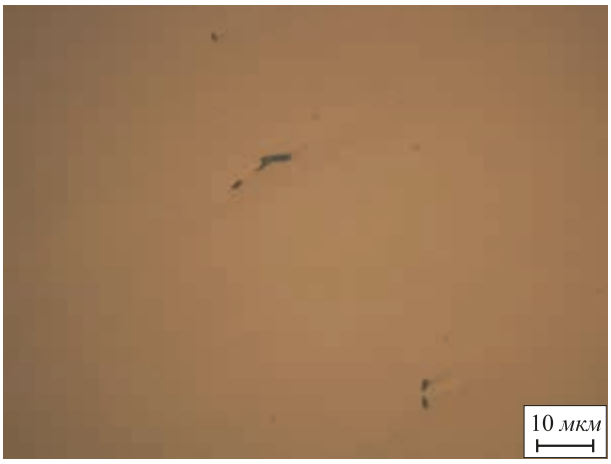

Рис. 2. Сульфиды марганца в непрерынолитой заготовке рельсовой стали Э76ХФ производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Fig. 2. Manganese sulphides in continuous cast billet of E76KhF rail steel produced by JSC “EVRAZ ZSMK”

изводства в ЭСПЦ АО «ЕВРАЗ ЗСМК» показал, что концентрация указанных элементов в готовой стали напрямую определяется соотношением чугуна и лома в металлозавалке. Повышение доли чугуна в металлозавалке в пределах от 22 до 50 % способствует снижению концентрации меди (рис. 3, *а*) и повышению содержания серы (рис. 3, *б*).

Влияние состава металлозавалки на содержание указанных элементов в стали определяется различием химического состава металлолома и чугуна. Так чугун содержит незначительные концентрации примесей цветных металлов, в том числе меди. Соответственно медь практически полностью вносится в сталь исходным металлическим ломом. В отличие от меди, сера имеет повышенную концентрацию в чугуне по сравнению с металлическим ломом – содержание серы в используемом для выплавки стали в ЭСПЦ чугуне составляет до 0,04 – 0,05 %.

Следует отметить, что предпосылкой внедрения в 2000 г. в электросталеплавильном цехе рассматриваемого предприятия технологии выплавки рельсовой стали с замещением части лома чугуном явилась именно необходимость снижения концентрации меди в стали рельсовых марок [22 – 24]. Действующим на тот моментом стандартом ГОСТ Р 51685 – 2000 допустимое содержание меди регламентировалось в пределах не более 0,20 % (в соответствии с действующим в настоящее время ГОСТ Р 51685 – 2000 требования по допустимому содержанию меди не изменились). Отличительной особенностью меди является тот факт, что она практически не удаляется в процессе производства стали, что обусловлено ее низким химическим сродством к кислороду.

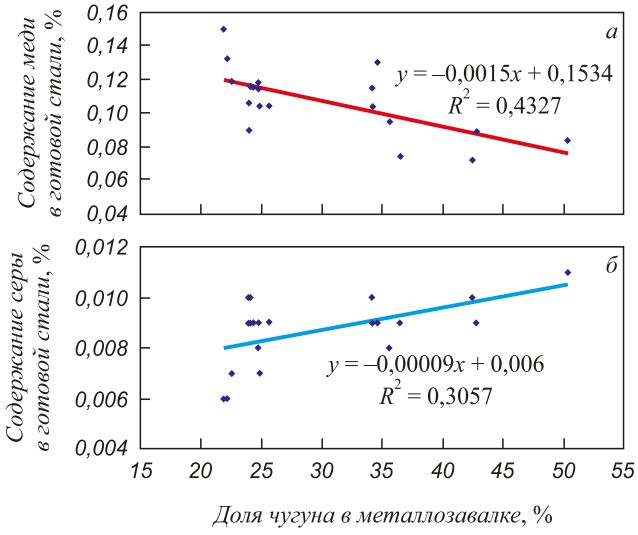

Рис. 3. Зависимость содержания меди (*а*) и серы (*б*) в рельсовой стали от доли чугуна в металлошихте для выплавки в дуговой электропечи

Fig. 3. Dependence of copper (*a*) and sulfur (*б*) content in rail steel on proportion of iron in metal charge for electric arc furnace smelting

Замещение части металлолома чугуном является одним из наиболее эффективных методов снижения содержания меди в готовой стали. Однако полученные данные свидетельствуют, что повышение доли чугуна в металлозавалке имеет не только положительные стороны. В частности, отмечается повышение содержание серы в готовой стали. Следует отметить, что в отличие от меди, содержание серы в рельсовой стали может быть существенно снижено за счет совершенствования технологических параметров выплавки и, в особенности, внепечной обработки металла в сталеразливочном ковше. Более значимым при оптимизации соотношения составляющих металлической шихты электроплавки рельсовой стали является изменение технико-экономических показателей производств. В частности, влияние на себестоимость рельсовой стали связано с различием цены чугуна и металлического лома, изменением расхода энерго- и теплоносителей, сырья и материалов при изменении состава металлошихты. С учетом непостоянства цен на составляющие металлошихты, добавочные материалы, электроэнергию и кислород, очевидно будет меняться и оптимальное соотношение чугуна и лома в металлозавалке.

Характер влияния состава металлической шихты на производительность электропечей также является неоднозначным, что связано с разнонаправленным изменением продолжительности различных периодов плавки, формирующих ее полный цикл [25 – 27]. Таким образом, для получения количественных зависимостей, адекватно отображающих реальную ситуацию, необходимым условием является статистическая обработка массива данных для конкретного агрегата за период времени со стабильной технологией производства.

Такой подход реализован при исследовании влияния состава металлошихты на технико-экономические показатели работы электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Проведено статистическое исследование влияния соотношения лома и чугуна в металлозавалке на технико-экономические показатели производства рельсовой стали в периоды, характеризующиеся следующей технологической схемой производства:

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

– выплавка в дуговой сталеплавильной печи с использованием 20 – 50 % твердого (чушкового) чугуна, последовательная внепечная обработка на двух установках ковш-печь и вакууматоре, а также 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 (угар) металла, длительность плавки.

В качестве базы для исследования использовали массив из 1000 плавок рельсовой стали Э76Ф (2007 г.) и Э76ХФ (2016 г.). Выбор указанных марок 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, содержание марганца на выпуске из печи и длительность плавки.

По полученным данным при увеличении доли как жидкого, так и твердого чугуна в металлозавалке удельный расход электроэнергии линейно уменьшается (рис. 4, *а*). При этом изменение расхода жидкого чугуна несколько больше сказывается на расходе электроэнергии по сравнению с твердым чугуном. Такое различие связано с 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 не столь значительно, как в случае применения жидкого чугуна.

Удельный расход кислорода при повышении доли чугуна в металлозавалке возрастает по параболическому закону (рис. 4, *б*) 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. 4, *в*), что объясняется пониженным содержанием марганца в чугуне относительно лома и повышенным окислением его за счет увеличения продолжительности и интенсивности продувки кислородом.

Зависимость длительности плавки от соотношения компонентов шихты в металлозавалке свидетельствует о наличии выраженного минимума на рассматриваемом интервале изменения расхода чугуна (рис. 4, *г*). 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 (период плавления, окислительный период, количество подвалок металлолома) плавки 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 сравнению с твердым чугуном. Также повышение расхода чугуна приводит к снижению или полному отказу от подвалок металлолома, что естественно уменьшает продолжительность плавки.

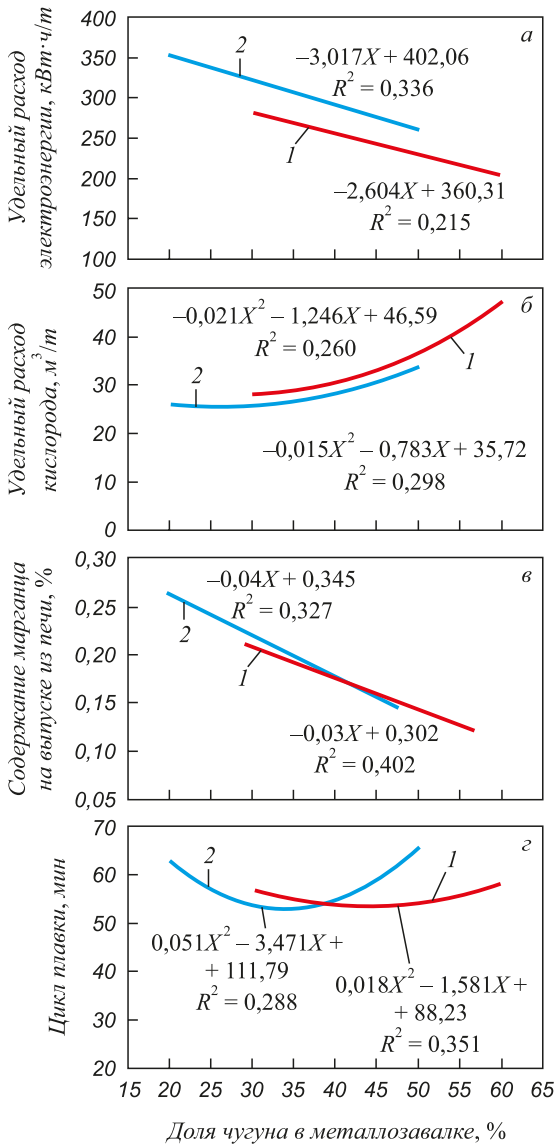

Рис. 4. Влияние доли чугуна в металлошихте на показатели удельного расхода электроэнергии (*а*), удельного расхода кислорода (*б*), содержания марганца на выпуске из печи (*в*) и производительности (*г*) производства рельсовой стали в дуговой электропечи: жидкий (*1*) и твердый (*2*) чугун

Fig. 4. Effect of iron share in metal charge on indicators of specific energy consumption (*a*); specific consumption of oxygen (*б*); manganese content at furnace outlet (*в*) and productivity (*г*) of rail steel production in electric arc furnace: liquid (*1*) and solid (*2*) cast iron

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

$$З_{сум} = (Р_{чуг}Ц_{чуг} + Р_{лом}Ц_{лом} + Р_{эл.эн}Ц_{эл.эн} + \\ + Р_{кисл}Ц_{кисл} + Р_{фер}Ц_{фер}), \quad (2)$$

где $Р_{чуг}$, $Р_{лом}$, $Р_{эл.эн}$, $Р_{кисл}$ и $Р_{фер}$ – удельные расходы чугуна, лома, электроэнергии, кислорода и ферросплавов соответственно; $Ц_{чуг}$, $Ц_{лом}$, $Ц_{эл.эн}$, $Ц_{кисл}$ и $Ц_{фер}$ – 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 его угаром удельный расход ферросплавов определится по следующей формуле:

$$Р_{фер} = \frac{10(C_{гот} - C_{вып})}{C_{ф}(100 - У)}, \quad (3)$$

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

Производительность цеха определяли по формуле

$$П_{заг} = \frac{1440M}{100T}ВФ, \quad (4)$$

где M – масса металлозавалки, т; T – цикл плавки, мин; В – выход годного, %; Ф – фонд времени работы цеха, сут/год.

Модель реализована в программе Excel и работает следующим образом. Для ввода исходных данных используется стандартное «окно», в качестве изменяющихся данных в котором выступают цены на чугун, металлический лом, электроэнергию, кислород и марганецсодержащие ферросплавы, а также такие параметры, как средняя масса металлозавалки, 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, изображенным на рис. 4. Затем производится расчет прогнозируемой величины суммарных затрат по статьям, зависящим от соотношения чугуна и лома в металлозавалке и прогнозируемой производительности цеха. Полученные данные выводятся на экран в виде графиков. На рис. 5, *а* в качестве примера представлены графики изменения затрат по статьям, зависящим от доли чугуна в металлозавалке при различном соотношении цен на чугун и металлолом. На рис. 5, *б* приведен график изменения прогнозируемой производительности цеха при варьировании доли чугуна в металлозавалке.

Использование разработанной модели позволяет выработать обоснованные рекомендации по оптимизации доли чугуна в металлозавалке для текущего уровня цен на используемые при электроплавке материалы и энергоносители с учетом изменения производительности цеха.

Выводы. Проведенными в условиях рельсового производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» исследованиями установлено значимое влияние повышения содержания меди и серы в электростали Э76ХФ (в диапазоне, не выходящим за пределы допустимых концентраций согласно требований ГОСТ) на увеличение отбраковки рельсов по поверхностным дефектам. Раскрыт механизм влияния указанных элементов на качество рельсов, обоснована зависимость содержания меди и серы в рельсовой электростали от соотношения основных компонентов металлошихты. С целью учета взаимосвязи качества рельсовой продукции и технико-экономических показателей ее производства разработана статистическая модель влияния состава металлошихты на производственные затраты и производительность

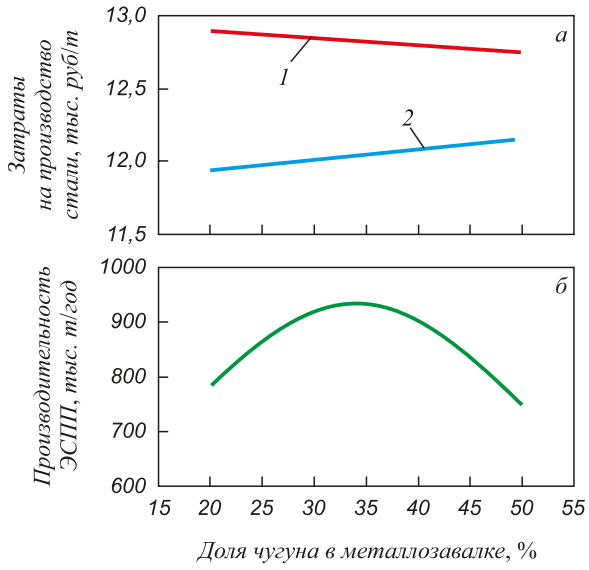

Рис. 5. Характер изменения затрат на производство рельсовой стали (*а*) и производительности дуговой электропечи (*б*) в зависимости от доли чугуна в исходной металлошихте:
1 – $Ц_{чуг} = Ц_{лом}$; *2* – $Ц_{чуг} = 1{,}1Ц_{лом}$

Fig. 5. Nature of changes in cost of rail steel production (*a*) and performance of electric arc furnace (*б*) depending on share of iron in initial metal charge:
1 – $Ц_{чуг} = Ц_{лом}$; *2* – $Ц_{чуг} = 1.1Ц_{лом}$

электросталеплавильного цеха, использование которой является базой для обоснованного выбора оптимальной доли чугуна в металлозавалке на конкретный временный период.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Golovatenko A.V., Umansky A.A., Dorofeev V.V. Analysis of the main trends in the development of rail production in Russia and abroad // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 150. P. 012002.
2. Головатенко А.В., Волков К.В., Александров И.В. и др. Ввод в эксплуатацию универсального рельсобалочного стана и освоение технологии производства рельсов на современном оборудовании в рельсобалочном цехе ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2014. № 6(1374). С. 32 – 38.
3. Shilov V.A., Shvarts D.L., Litvinov R.A. Shaping of metal when rolling rails in universal grooves // Steel in Translation. 2008. Vol. 38. No. 3. P. 214 – 216.
4. Уманский А.А., Головатенко А.В., Кадыков В.Н. Совершенствование режимов прокатки железнодорожных рельсов в обжимных клетях универсального рельсобалочного стана // Черные металлы. 2016. № 11. С. 16 – 21.
5. Shvarts D.L. Rolling of rail profiles in a universal groove. Part 1 // Steel in Translation. 2015. Vol. 45. No. 6. P. 430 – 435.
6. Shvarts D.L. Rolling of rail profiles in a universal groove. Part 2 // Steel in Translation. 2015. Vol. 45. No. 7. P. 499 – 502.
7. Golovatenko A.V., Umansky A.A., Kadykov V.N. Improvement of rolling modes of long length rails on the universal rail and structural steel mill “EVRAZ ZSMK” // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 150. P. 012028.
8. Shilov V.A., Shvarts D.L., Skosar’ E.O. Aspects of the rolling of long rails on a universal rail-beam mill // Metallurgist. 2016. Vol. 60. No. 3. P. 260 – 266.
9. Головатенко А.В., Волков К.В., Дорофеев В.В. и др. Развитие технологии прокатки и процессов калибровки железнодорожных рельсов // Производство проката. 2014. № 2. С. 25 – 39.
10. Дорофеев В.В., Уманский А.А., Головатенко А.В. и др. Анализ и разработка калибровки прокатных валков для производства асимметричных рельсовых профилей в условиях универсального рельсобалочного стана // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 12. С. 941 – 947.
11. Svejkovsky U. Newest technologies for economical sections production // AISE Steel Technology. 2002. No. 2. P. 33 – 39.
12. Frank E. Former. Steel dynamics commissions its new structural and rail division // AISE Steel Technology. 2002. No. 11– 12. P. 27 – 35.
13. Chen R., Wang P., Wei X. Track-bridge longitudinal interaction of con-tinouswelded rails on arch bridge // Mathematical Problems in Engineering. 2013. Available at URL: http://dx.doi.org/10.1155/2013/494137 (Дата обращения 15.02.2018 г.).
14. Kozan E., Burdett R. A railway capacity determination model and rail access charging methodologies // Transportation Planning and Technology. 2005. Vol. 28. No. 1. P. 27 – 45.
15. Chang Y.A. Phase Diagrams and Thermodynamic Properties of Copper-Metal Systems: Monograph. – New York: INCRA, 1979. – 220 p.
16. Медь в черных металлах: Сб. статей / Под ред. И. Ле Мэя, Л.М.-Д. Шетки; пер. с англ. И.Д. Марчуковой, А.Н. Штейнберга; под ред. О.А. Банных. – М.: Металлургия, 1988. – 310 с.
17. Гинцбург Я.С., Андрацкий К.К. Прокатка качественной стали. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1953. – 464 с.
18. Еланский Г.Н., Еланский Д.Г. Строение и свойства металлических расплавов. – М.: МГВМИ, 2006. – 228 с.
19. Баум Б.А., Тягунов Г.В., Барышев Е.Е., Цепелев В.С. Фундаментальные исследования физикохимии металлических расплавов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 467 с.
20. Suzuki H. Hot ductility in steels in the temperature range between 900 and 600 degree C - related to the transverse facial cracks in the continuously cast slabs // Tetsu to Hagane. J.I.S.I. Japan. 1981. Vol. 67. No. 8. P. 1180 – 1189.
21. Губенко С.И. Трансформация неметаллических включений. – М.: Металлургия, 1991. – 224 с.
22. Katunin A.I., Godik L.A., Obsharov M.V. etc. Use of liquid pig iron in electric-arc furnaces // Metallurgist. 2000. Vol. 46. No. 6. P. 299 – 301.
23. Katunin A.I., Godik L.A., Kozyrev N.A. etc. Smelting rail steel in arc furnaces using liquid iron // Steel in Translation. 2001. Vol. 31. No. 1. P. 19 – 21.
24. Годик Л.А., Козырев Н.А., Данилов А.П. и др. Использование жидкого чугуна при выплавке стали в дуговых электропечах // Электрометаллургия. 2002. № 1. С. 9 – 14.
25. 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.
26. Katunin A.I., Kozyrev N.A., Obsharov M.V. etc. Economic aspects of the use of liquid pig iron in electric steelmaking // Metallurgist. 2000. Vol. 44. No. 11 – 12. P. 560 – 562.
27. Godik L.A., Kozyrev N.A., Shabanov P.A. etc. Smelting steel in electrofurnaces with increased hot-metal consumption // Steel in Translation. 2009. Vol. 39. No. 5. P. 412 – 415.

Поступила 15 марта 2018 г.

Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2018. Vol. 61. No. 11, pp. 876–883.

INTEGRATED INFLUENCE OF MELTING PARAMETERS OF RAIL STEEL ON RAIL PRODUCTS QUALITY AND TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF THE PRODUCTION

A.A. Umanskii, L.V. Dumova

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. Analysis of literature and production data has shown that despite the significant improvement in quality of domestic rail products, achieved in the last decade due to fundamental technical re-equipment of rail production, there is a problem of increased rejection of rails for surface defects. Based on studies of influence of rail steel chemical composition on quality of rails produced by «EVRAZ ZSMK», there was established a significant effect of increasing copper content in the range of 0.07 – 0.15 % and of sulfur – in the range of 0.006 – 0.011 % in E76KhF steel to increase rejection caused by rail surface defects. Mechanism of the influence of these elements concentration in rail steel on finished rails quality was revealed. Decisive influence of ratio of pig iron and scrap in metal charge on copper and sulfur content in rail steel was evidenced – higher rate of cast iron in metal charge within 20 – 50 % contributes to decrease of copper concentration and increase of sulfur content. To justify optimal composition of the charge for rail steel melting in regard to rail products quality and technical and economic indicators of production, study of the effect of cast iron (liquid and solid) to scrap ratio in metal charge on basic parameters of furnaces’ operation was conducted. As a result, it was found that

with an increase in share of both liquid and solid iron in metal charge, there are linear decrease in specific electricity consumption, increase in specific oxygen consumption according to parabolic law and a linear decrease in manganese content in furnace output. The obtained dependences of melting duration on ratio of charge components in metal charge indicates presence of prominent minimum, when using liquid iron in the range of 35 – 40 %, and when using solid iron – in the range of 30 – 35 %. Based on the regression equations, statistical model was constructed for the influence of metal charge composition on technical and economic performance of the melt charge in rail steel smelting, in which optimization parameters are: total cost, depending on the metal stock composition and performance of the shop for suitable billets produced by continuous casting. Application of the obtained model allows to develop reasonable recommendations on the optimal proportion of iron in the metal for current level of prices for materials and energy used in electric smelting, taking into account changes in the shop productivity.

Keywords: rail steel, railway rails, surface defects, metal charge, impurities of non-ferrous metals, sulfides, technical and economic indicators.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-11-876-883

REFERENCES

1. Golovatenko A.V., Umansky A.A., Dorofeev V.V. Analysis of the main trends in the development of rail production in Russia and abroad. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, pp. 012002.

2. Golovatenko A.V., Volkov K.V., Aleksandrov I.V., Kuznetsov E.P., Dorofeev V.V., Sapelkin O.I. Commissioning of the universal rail mill and development of technology of rails production on modern equipment in the rail workshop of EVRAZ ZSMK. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2014, no. 6(1374), pp. 32–38. (In Russ.).

3. Shilov V.A., Shvarts D.L., Litvinov R.A. Shaping of metal when rolling rails in universal grooves. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 3, pp. 214–216.

4. Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Kadykov V.N. Improving rail rolling modes in crimping stands of universal rail mill. *Chernye metally*. 2016, no. 11, pp. 16–21. (In Russ.).

5. Shvarts D.L. Rolling of rail profiles in a universal groove. Part 1. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 6, pp. 430–435.

6. Shvarts D.L. Rolling of rail profiles in a universal groove. Part 2. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 7, pp. 499–502.

7. Golovatenko A.V., Umansky A.A., Kadykov V.N. Improvement of rolling modes of long length rails on the universal rail and structural steel mill "EVRAZ ZSMK". *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, pp. 012028.

8. Shilov V.A., Shvarts D.L., Skosar' E.O. Aspects of the rolling of long rails on a universal rail-beam mill. *Metallurgist*. 2016, vol. 60, no. 3, pp. 260–266.

9. Golovatenko A.V., Volkov K.V., Dorofeev V.V., Stepanov S.V., Dobryanskii A.V. Development of rolling technology and rail grooving processes. *Proizvodstvo prokata*. 2014, no. 2, pp. 25–39. (In Russ.).

10. Dorofeev V.V., Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Kadykov V.N., Dobryanskii A.V. Analysis and development of rolls calibration for production of asymmetrical rail profiles at universal rolling mill. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 12, pp. 941–947. (In Russ.).

11. Svejkovsky U. Newest technologies for economical sections production. *AISE Steel Technology*. 2002, no. 2, pp. 33–39.

12. Frank E. Former. Steel Dynamics commissions its new structural and rail division. *AISE Steel Technology*. 2002, no. 11-12, pp. 27–35.

13. Chen R., Wang P., Wei X. Track-bridge longitudinal interaction of con-tinuous welded rails on arch bridge. *Mathematical Problems in Engineering*. 2013. Available at URL: http://dx.doi.org/10.1155/2013/494137 (Accessed 15.02.2018).

14. Kozan E., Burdett R. A railway capacity determination model and rail access charging methodologies. *Transportation Planning and Technology*. 2005, vol. 28, no. 1, pp. 27–45.

15. Chang Y.A. *Phase Diagrams and Thermodynamic Properties of Copper-Metal Systems: Monograph*. New York: INCRA, 1979, 220 p.

16. *Med' v chernykh metallakh: sbornik statei* [Copper in ferrous metals: Collection of papers]. Mei I.Le, Shetki L.M.-D. ed., Trans from Eng. Moscow: Metallurgiya, 1988, 310 p. (In Russ.).

17. Gintsburg Ya.S., Andratskii K.K. *Prokatka kachestvennoi stali* [Rolling of high quality steel]. Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo literatury po chernoi i tsvetnoi metallurgii, 1953, 464 p. (In Russ.).

18. Elanskii G.N., Elanskii D.G. *Stroenie i svoistva metallicheskikh rasplavov* [Structure and properties of metal melts]. Moscow: MGVMI, 2006, 228 p. (In Russ.).

19. Baum B.A., Tyagunov G.V., Baryshev E.E., Tsepelev V.S. *Fundamental'nye issledovaniya fizikokhimii metallicheskikh rasplavov* [Fundamental studies of physics and chemistry of metal melts]. Moscow: Akademkniga, 2002, 467 p. (In Russ.).

20. Suzuki H. Hot ductility in steels in the temperature range between 900 and 600 degree C – related to the transverse facial cracks in the continuously cast slabs. *Tetsu to Hagane. J.I.S.I. Japan*. 1981, vol. 67, no. 8, pp. 1180–1189.

21. Gubenko S.I. *Transformatsiya nemetallicheskikh vklyuchenii* [Transformation of non-metallic inclusions]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 224 p. (In Russ.).

22. Katunin A.I., Godik L.A., Obsharov M.V., Kozyrev N.A., Timmerman N.N. Use of liquid pig iron in electric-arc furnaces. *Metallurgist*. 2000, vol. 46, no. 6, pp. 299–301.

23. Katunin A.I., Godik L.A., Kozyrev N.A., Timmerman N.N., Sychev P.E. Smelting rail steel in arc furnaces using liquid iron. *Steel in Translation*. 2001, vol. 31, no. 1, pp. 19–21.

24. Godik L.A., Kozyrev N.A., Danilov A.P., Zakharova T.P., Timmerman N.N. Use of liquid iron in electric arc furnaces smelting of steel. *Elektrometallurgiya*. 2002, no. 1, pp. 9–14. (In Russ.).

25. Lipukhin Yu.V., Molchanov O.E., Baldaev B.Ya. Experience of steel smelting in 100-t electric arc furnaces using liquid iron in charge. *Stal'*. 1997, no. 7, pp. 26–27. (In Russ.).

26. Katunin A.I., Kozyrev N.A., Obsharov M.V., Timmerman N.N., Sychev P.E. Economic aspects of the use of liquid pig iron in electric steelmaking. *Metallurgist*. 2000, vol. 44, no. 11-12, pp. 560–562.

27. Godik L.A., Kozyrev N.A., Shabanov P.A., Timmerman N.N., Zakharova T.P. Smelting steel in electrofurnaces with increased hot-metal consumption. *Steel in Translation*. 2009, vol. 39, no. 5, pp. 412–415.

Acknowledgements. The work was performed in SibSIU within the framework of the basic part of the State task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 11.6365.2017 / 8.9 using the equipment of the CCP "Materials Science" of SibSIU.

Information about the authors:

Umanskii A.A., *Cand. Sci. Eng., Assist. Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy, Director of the Center for Collective Use "Materials Science"* (umanskii@bk.ru)

Dumova L.V., *MA Student of the Chair of Ferrous Metallurgy* (doumova@bk.ru)

Received March 15, 2018