



УДК 669.74

Поступила 20.06.2016

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ ОТ КАЧЕСТВА ШИХТЫ

### OVERALL PERFORMANCE OF THE ELECTRIC ARC MELTING FURNACE DEPENDING ON QUALITY OF FURNACE CHARGE

*А. В. СТЕБЛОВ, ООО «Инновационные металлургические технологии», Технопарк Сколково, г. Москва, Россия, ул. Луговая, 4. E-mail: info@inmet-sk.com*

*A. V. STEBLOV, LLC «Innovative Metallurgical Technology», Technopark Skolkovo, Moscow, Russia, Lugovaya str. 4. E-mail: info@inmet-sk.com*

*Качество шихты во многом определяет эффективность плавки в электродуговой печи. При тенденции роста легковесного лома с повышенным содержанием цветных примесей шредирование лома позволяет повысить его металлургическую ценность и улучшить технико-экономические показатели работы ДСП.*

*The quality of furnace charge in an electric arc melting furnace to a large extent determines the efficiency of melting. With a tendency of increase of light scrap with a high content of non-iron impurities scrap fine crushing can increase the metallurgical value of scrap and improve technical and economic parameters of electric arc furnace operation.*

**Ключевые слова.** Электродуговая плавильная печь, металлический лом, шредерный лом.

**Keywords.** Electric arc melting furnace, scrap-metal, shredder scrap.

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) большой мощности сегодня практически исчерпали возможности в своем развитии. Введенная в 2008 г. в эксплуатацию на литейно-прокатном комплексе ОАО «ОМК-Сталь» (г. Выкса) 160-тонная плавильная печь (Danieli) выпускала жидкий металл для доводки в печи-ковше через 50 мин после завалки лома. При технологии завалки шихты двумя корзинами расход электроэнергии составлял по проекту 375 кВт·ч/т при вдувании углерода 15 кг/т и кислорода до 35 м<sup>3</sup>/т. Такая технология, по сути, представляет собой совмещение технологии выплавки стали электродуговой печи и конвертора и позволяет одной печью производить 1200 тыс. т жидкой стали в год. Последняя разработка FAI- FUCHS GmbH – электродуговая печь ULTIMATE [1] позволяет на 160-тонной печи выплавлять в год 1800 тыс. т стали. Конструкция «высокой» печи дает возможность производить завалку лома одной корзиной. Общая длительность плавления – 30 мин и работа под током – 22 мин. Достигнут практический предел производительности по условиям теплопередачи в металле. Металлурги сегодня делают упор уже не на производительность, а на качество и себестоимость жидкой стали. По мнению С. В. Казакова [2], основные усилия нужно сосредоточить на качестве подготовки шихты для переплавки. Если в 2002 г. стоимость лома в общем объеме затрат при выплавке в ДСП составляла 65%, то теперь более 75%. Ухудшается качество лома, он становится более легковесным и засоренным неметаллическими включениями и цветными металлами. Значительно увеличивается доля легковесного лома 12А толщиной менее 6 мм. Это прежде всего бытовой лом, бочкотара, старые автомобили. Основным направлением по улучшению качества шихты является шредирование лома, его измельчение и отделение от металлической части органической составляющей и примесей цветных металлов. Эффективность использования продукта шредированного лома – шрота подтверждается многолетней практикой металлургических предприятий за рубежом. Шредеры различной мощности стали неотъемлемой частью предприятий по переработке лома. В мире их сегодня насчитывается более 700 [3], в том числе в США – более 200, в Германии – 44, в Англии – 46, во Франции – около 40. Прежде всего, они используются для утилизации подержанных автомобилей. В России за последние пять лет введены четыре шредера мощностью от 60 до 100 т/ч. В настоящее время постоянно функционируют всего семь шредерных установок. Два шреде-

ра установлены на Украине: на УкрВторчермете с годовым производством 1,4 млн. т и в 2014 г. на предприятии «Донецксталь». Основным лидером в изготовлении таких установок является фирма Metso Lindemann GmbH (Дюссельдорф). В планах российских вторметов и крупных металлургических предприятий – ввод новых шредеров с доведением общего количества до 24–27 шт. к 2020 г. Это следует из анализа изменения структуры металлофонда России в виду постоянного увеличения подлежащих утилизации старых автомобилей. Сегодня только в Москве подлежат утилизации около 175 тыс. шт. автомобилей, а в Санкт-Петербурге – около 80 тыс. шт. ежегодно. Прогноз по ЦФО – к 2020 г. не менее 180 тыс. шт. автомобилей будут утилизироваться ежегодно.

Выплавка стали с использованием шредерного лома была опробована в 2004 г. на Молдавском металлургическом заводе (г. Рыбница) [4] и позднее, в мае 2005 г. на Белорусском металлургическом заводе [5]. Количество шредерного лома в опытных плавках варьировалось от 30 до 100%. На обоих заводах подтверждена эффективность использования этого лома. Достигнуто сокращение длительности цикла плавки в среднем на 13 мин (европейские показатели 20–25 мин), расход электроэнергии на 1 т снижен на 5,4%, расход шихты – на 4%, сокращено суммарное количество примесей в готовой стали. Общее повышение эффективности плавки можно объяснить прежде всего ростом насыпной удельной плотности шихты с 0,75 до 0,95–1,2 т/м<sup>3</sup>, что положительно отразилось на сокращении количества подвалок и трамбовки шихты, на ведении режима плавки в первый период и сокращения количества поломок электродов.

В сентябре 2013 г. на литейно-прокатном комплексе ОАО «ОМК» (г. Выкса) была введена в эксплуатацию шредерная установка мощностью 1 млн. т шрота в год. Производство собственного шредированного лома в промышленных масштабах можно считать с января 2014 г. В 2014–2015 гг. ООО «ИНМЕТ» Технопарк Сколково выполнил комплекс работ, направленных на снижение сквозного расходного коэффициента от завалки шихты до получения горячекатаного листа. Исследования по влиянию шихтовки на выход годного проводили на ДСП-160 Danieli. Характеристики печи и технология приведены в [6].

Были проведены исследования на балансовых плавках с различными вариантами шихтовок и статистическая обработка данных по 9253 плавкам за период 2012 г. – март 2015 г. По исходному массиву данных был выполнен расчет удельной плотности по всему объему шихты каждой плавки с учетом доли лома каждой категории. Установлено, что расчетная удельная плотность всей шихты на плавку колеблется от 0,55 (min) до 1,9 т/м<sup>3</sup> (max) при среднем значении 1,134 т/м<sup>3</sup> в год. При загрузке шихты двумя корзинами суммарная средняя масса шихты в печи составляла 175,4 т.

В табл. 1 приведены данные по насыпной плотности лома, используемого на ОАО «ОМК».

Т а б л и ц а 1. Насыпная плотность шихтовых материалов

Вид лома	Удельная плотность, т/м <sup>3</sup>	Вид лома	Удельная плотность, т/м <sup>3</sup>
Чугун	2,756	Лом 2АШ	0,902
ГБЖ	2,869	Оборотный лом	1,759
Брикеты 6А	2,721	Лом 3АЖД	1,453
Лом стальной	0,555	Пакеты 9А	1,800
Лом МКС	2,100		

П р и м е ч а н и е. ГБЖ – горячебрикетированное железо; МКС – обрезь листа со стана 5000; 3АЖД – железнодорожный лом в виде рельс, подкладок; оборотный лом – обрезь МНЛЗ; 2АШ – шрот 2А.

Лом для шихтования плавки соответствовал требованиям ГОСТ 2787-75. Лом стальной включает в себя лом 1-3А и легковес 12А.

В табл. 2 приведены статистические данные по основным видам металлического лома, которые наиболее часто используются в качестве шихты, и подтвердивших корреляционную связь между РКМ<sub>дсп</sub> (расходный коэффициент металла в ДСП), количеством загружаемых корзин и  $\sum_{\text{шихты,т}}$  в каждой плавке.

Т а б л и ц а 2. Статистические характеристики шихты

Количество корзин	Расчетная плотность, т/м <sup>3</sup>	$\sum_{\text{шихты}}$	Чугун	Лом стальной	Ж/Д	6А	2АШ	Лом оборотный	МКС	ГБЖ
Среднее 2,31	1,135	174,94	20,08	98,8	9,1	4,1	21,6	8,78	9,97	2,51
Максимальное 4	1,9	209,9	41,2	200	22,2	30,5	91	71,8	48,6	62,8
Минимальное 2	0,55	148,2	0	28,7	0	0	0	0	0	0

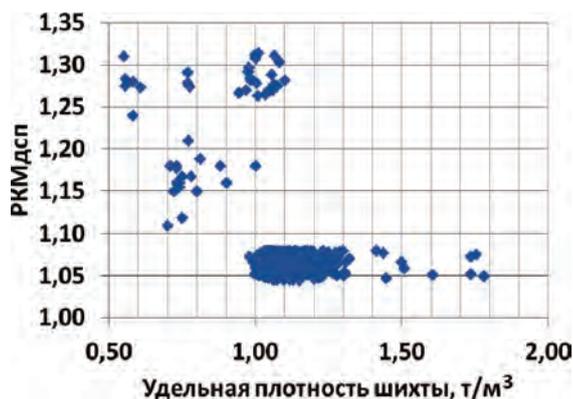


Рис. 1. Изменения  $RKM_{dsp}$  в зависимости от расчетной плотности шихты в плавке

$RKM_{dsp}$  имеют более высокую удельную плотность шихты и соответственно загрузку меньшим количеством корзин.

По сформированной выборке плавков в указанных интервалах была сделана статистическая обработка данных и найдена корреляционная зависимость между  $RKM_{dsp}$  и удельной плотностью шихты в каждой плавке (рис. 1).

После обработки данных было получено уравнение регрессии, позволяющее количественно оценить влияние плотности шихты на  $RKM_{dsp}$ :

$$RKM_{dsp} = 1,212 - 0,127\rho, \quad (1)$$

где  $\rho, т/м^3$  – расчетное значение удельной плотности шихты в плавке;  $R = 0,32$ , стандартная ошибка  $\sigma_{ош} = \pm 0,03$ ,  $n = 1039$  плавков.

В табл. 3 приведены данные по расчетной плотности  $\Sigma_{шихты,т}$  массы по категориям лома для вариантов  $RKM_{dsp}$  (min, max). Из таблицы видно, что плавки с меньшим

Таблица 3. Данные по шихтовке плавков с  $RKM_{dsp}$  (min, max)

$RKM_{dsp}$	Количество корзин	Расчетная плотность, $т/м^3$	$\Sigma_{шихты}$	Чугун	Лом стальной	Ж/Д	6А	2АШ	Лом оборотный	МКС	ГБЖ
1,067 min	2,1	1,106	173,2	19,6	91,5	7,8	2,0	31,8	9,7	10,2	0,6
1,28 max	2,6	0,95	174,3	14,3	121,2	6,6	2,3	16,0	6,6	7,1	0,20
факторы	$N$	$\rho$		$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$

По результатам статистического исследования выборки данных были получены следующие уравнения:

для прогнозирования условной плотности суммарной шихты плавки от видов лома (табл. 3):

$$\rho = 1,1518 + 0,0092X_1 - 0,0033X_2 + 0,0012X_3 + 0,0088X_4 - 0,0014X_5 + 0,0035X_6 + 0,0052X_7 + 0,0096X_8, \quad (2)$$

где  $X_1$  – масса чугуна, т;  $X_2$  – масса стального лома, т (смешанный лом);  $X_3$  – масса лома Ж/Д т;  $X_4$  – масса брикета 6А, т;  $X_5$  – масса лома 2АШ, т;  $X_6$  – масса лома оборотного, т;  $X_7$  – масса лома МКС, т;  $X_8$  – масса ГБЖ, т;  $R = 0,91$ , стандартная ошибка  $\sigma_{ош} = \pm 0,01$ ,  $n = 9523$  плавки;

для прогнозирования количества загружаемых корзин с шихтой ( $N$ ) в зависимости от удельной плотности шихты на корзину:

$$N = 3,37 - 0,927\rho, \quad (3)$$

где  $R = 0,34$ , стандартная ошибка  $\sigma_{ош} = \pm 0,4$ ,  $n = 9523$  плавки.

Уравнение (3) с достаточной точностью позволяет качественно оценить тенденцию на увеличение времени завалки шихты за счет ухудшения качества лома в целом за рассматриваемый период времени. Используя уравнения (1)–(3), можно сделать рекомендации по загрузке шихты таким образом, чтобы максимально снизить  $RKM_{dsp}$  за счет обоснованного рационального варианта шихтовки. Одним из приемов такой шихтовки может быть вариант для  $RKM_{dsp} = 1,067$  (min) (табл. 3).

Анализ химических элементов в жидкой стали перед сливом в основном отражает качество исходного лома. Было установлено, что в анализируемом химическом составе металла на выпуске в сталеразливочный ковш статистически значимыми параметрами, влияющими на  $RKM_{dsp}$ , являются содержания серы (S), меди (Cu), сурьмы (Sb). Исследования по влиянию шредированного лома на  $RKM_{dsp}$  включали анализ работы цеха ОАО «ОМК» за 2012 г. по октябрь 2013 г., когда использовали привозной шрот в количестве 11,47 т на плавку.  $RKM_{dsp}$  в этот период составил 1,124 при суммарной шихте на плавку 175,4 т. Сумма всех цветных примесей  $\Sigma ЦП = (Cr + Ni + Cu, + Mo + Sn + As + Sb)$  составила в среднем на плавку 0,395% (0,1797% – минимальное; 0,7097% – максимальное значение). После пуска собственной шредерной установки ОАО «ОМК» увеличило долю шрота в шихте. При сохранении средней массы загрузки

лома в печь в 2013 г. доля лома 2АШ выросла до 15,4 т, а в 2014 г. в среднем составила 37,82 т, что положительно сказалось на снижении  $\Sigma$  ЦП = 0,377 и РКМ<sub>дсп</sub> до 1,078 (табл. 4).

Таблица 4. Сравнение по сумме цветных примесей ( $\Sigma$  ЦП)

Год	РКМ <sub>дсп</sub>	$\Sigma$ ЦП, %	Лом 2АШ, т
2012	1,124	0,42	11,47
2013	1,113	0,395	15,4
2014	1,078	0,377	37,82

Статистическая обработка данных за указанный период позволила получить подтверждение влияния доли лома 2АШ на снижение расходного коэффициента (рис. 2). За 2014 г. около 15% плавок шихтовалось ломом 2АШ в объеме 50–90 т.

В результате выполненной работы был предложен вариант шихтовки плавки двумя корзинами без потерь на трамбовку, включая чугун – 20 т на плавку (теоретически по контракту 20% – 35 т); лом стальной привозной –  $\leq 40$  т; лом Ж/Д –  $\approx 8$ ; брикеты 6А –  $\geq 3$ ; лом МКС –  $\approx 10$ ; ГБЖ – 10; лом оборотный –  $\geq 12$ ; лом 2АШ –  $\geq 70$  т.

Анализ технико-экономических показателей подтвердил эффективность внедрения шредера на ОАО «ОМК». Повышение насыпной плотности шихты позволяет обеспечить стабильную завалку двумя корзинами против среднего уровня 2,31 корзины, снизить длительность загрузки лома в среднем на 2 мин на плавку, сократить цикл плавки на 2,4 мин. За счет снижения расхода электроэнергии и электродов на 1 т стали расходы по переделу на новом варианте шихтовки уменьшены на 8,7%, себестоимость в целом снизилась на 5,6%, рентабельность продукции в целом увеличена на 12%. Установлена экономически целесообразная загрузка доли шредерного лома в печь, при которой экономический эффект от применения шрота становится стабильно статистически значимым. Он составляет около 35%. При таких показателях окупаемость установки на 250 тыс. т лома в год не превышает 14 месяцев. Опыт работы завода, как и других предприятий, внедривших технологию шредерной переработки лома, показывает высокую эффективность вкладывания финансовых средств в это оборудование и несомненную целесообразность использования подобного оборудования для белорусских металлургов. В настоящий момент на «БЕЛВТОРМЕТ» работают две шредерные установки мощностью по 2000 л.с. производительностью 70 т/ч. Одна машина производства фирмы «Albert Hoffmann» GmbH (Германия) работает с 2006 г. в пос. Гатово, вторая машина фирмы «Danieli» (Италия) работает с 2014 г. К сожалению, загрузка этих машин не полная в виду малой собираемости подержанной автотехники и бытового лома. С одной стороны, количество автомобилей в стране на душу населения уже на уровне России и Европы, причем много вышедшей из строя, с другой – не продуманная система сдачи этой техники на Вторметы. Сдать машину на лом – больше хлопот, чем выгоды, поэтому и ржавеет она и занимает место во дворах. Можно было бы организовать поставку старой автотехники и лома 12А для переработки на шредерах из России и Украины, а потом поставить ее с прибылью для поставщика на Белорусский металлургический завод. Белвтормет получит прибыль, загрузив свою технику, а БМЗ – лом высокого качества. Но наше законодательство такой схемы работы не предусматривает, хотя инвесторы готовы поставить лом в объеме, который сейчас требуется заводу и, тем самым, помочь в ситуации, когда необходимы оборотные средства на закупку лома. Финансовые схемы работы есть, остается только дать им дорогу. При всей очевидности технических преимуществ руководитель завода всегда в основу решения ставит экономическую целесообразность.

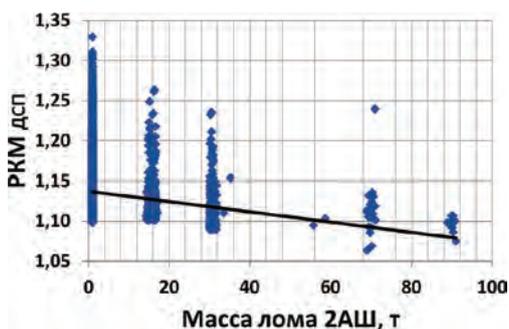


Рис. 2. Влияние лома 2АШ в общей массе шихты на РКМ<sub>дсп</sub>

Цены на виды лома и тарифы на электроэнергию – величины переменные, но тенденции и пропорции сохраняются. За многие годы сформировалось соотношение цены по лому. Так, лом 12А в среднем на 15–20% дешевле, чем лом 3А. В свою очередь шредерный лом, полученный из легковеса, имеет неоспоримые преимущества как по качеству производимой жидкой стали, так и по улучшению экономических показателей. В работе [7] авторы приводят методологию расчета эффективности и показывают, что при установившихся соотношениях цен на виды лома, расходов на электроэнергию и амортизацию рентабельность переработки легковеса 12А в шрот составляет не менее 12%. Эффективность шредера в мировой металлургии

ческой практике, вероятно, также достаточно высока, учитывая, что таких установок в передовых странах в десятки раз больше, чем в СНГ.

### Литература

1. Нархольц Т., Виллемин Б. Электродуговая печь серии ULTIMATE – сталеплавильный агрегат нового поколения // Электрометаллургия. 2005. № 4. С. 8–12.
2. Казаков С. В. Металлолом: Взгляд со стороны металлургов // Рынок вторичных металлов. 2006. № 5(37). С. 18–19.
3. Куковьякин Д. Н. Электросталеплавильное производство и шредерная переработка лома // Рынок вторичных металлов. 2007. № 3(41). С. 39–43.
4. Костин А. С., Деревянченко И. В., Кучеренко О. Л. Шихтовка шредерным ломом // Рынок вторичных металлов. 2005. № 5(21). С. 35–36.
5. Шаруда А. Н. Использование шредерного лома // Рынок вторичных металлов. 2006. № 1(33). С. 41–43.
6. Стеблов А. Б. Работа электродуговой сталеплавильной печи с жидким остатком металла // Литье и металлургия. 2016. № 1(82). С. 66–71.
7. Супрун С. В., Юзов О. В. Эффективность шредерного лома // Рынок вторичных металлов. 2007. №3 (41). С. 44–45.

### References

1. Narholz T., Willemin B. Elektrodugovaya pech serii ULTIMATE – steleplavilniy agregat novogo pokoleniya [Electric arc furnace ULTIMATE – steel-making unit of new generation]. *Elektrometallurgiya = Electrometallurgy*, 2005, no. 4, pp. 8–12.
2. Kazakov S. V. Metallolom. Vzglyd so storoni metallurgov [Scrap: view of metallurgists]. *Rynok vtorichnyh metallov = The market of secondary metals*, 2006, no. 5(37), pp. 18–19.
3. Kukovyakin D. N. Elektrostaleplavilnoe proizvodstvo i shredernaya pererabotka loma [Electric steel production and shredder scrap processing]. *Rynok vtorichnyh metallov = The market of secondary metals*, 2007, no. 3(41), pp. 39–43.
4. Kostin A. S., Derevyanchenko I. V., Kucherenko O. L. Shihtovka chredernym lomom [Burdening with the shredder scrap]. *Rynok vtorichnyh metallov = The market of secondary metals*, 2005, no. 5(21), pp. 35–36.
5. Sharuda A. N. Ispolzovanie chredernogo loma [The use of shredder scrap]. *Rynok vtorichnyh metallov = The market of secondary metals*, 2006. no. 1(33), pp. 41–43.
6. Steblov A. B. Rabota elektrodugovoy staleplavilnoy pechi s zhidkim ostatkom metalla [Operation of the electric arc furnace with liquid residues metal]. *Litj'e i metallurgij = Foundry production and metallurgy*, 2016, no. 1(82), pp. 66–71.
7. Suprun S. V., Yuzov O. V. Effektivnost' shredernogo loma [The effectiveness of shredder scrap]. *Rynok vtorichnyh metallov = The market of secondary metals*, 2007, no. 3(41), pp. 44–45.