

Учитывая значительные пылегазовые выбросы при плавке в электродуговых печах, необходимо устанавливать эффективные очистные сооружения, что также потребует дополнительного расхода электроэнергии, которая будет повышать себестоимость получаемого расплава.

В работе [3] приведены сведения по относительной себестоимости 1 т жидкого чугуна в зависимости от способа выплавки. Если себестоимость при плавке в газовой вагранке принять за 1,0, то в дуговой печи и индукционной тигельной печи промышленной частоты она увеличивается в 2 раза, в дуговой печи постоянного тока – в 1,8 раза и в индукционной тигельной средней частоты – в 1,4 раза. Однако при этом следует учитывать качество получаемого расплава и экологические последствия.

#### Список использованных источников

1. Мельников, А.П. Современные тенденции развития технологии в литейном производстве / А.П. Мельников, Д.М. Кукуй // Литье и металлургия. – 2008. – № 3. – С.65 – 80.
2. Михайлов, Д.П. Печи литейных цехов / Д.П. Михайлов, А.Н. Болдин, А.Н. Граблев. – Ст. Оскол: ТНТ. – 2015. – 496 с.
3. Лузгин, В.И. Индукционные печи средней частоты нового поколения / В.И. Лузгин, А.Ю. Петров, Л.И. Фаерман // Металлургия машиностроения. – 2002. – № 1. С.4 –13.

УДК 669.054.82

#### Особенности переработки рафинировочных шлаков сталеплавильного производства

Магистрант Джураев Т.Х.,

студенты: гр.104111 Семенец И.Б., гр. 10405112 Прокопчук Д.А.,

гр. 10405113 Григорьев П.Е.

Научный руководитель – Неменёнок Б.М.

Белорусский национальный технический университет

г. Минск

Из всего многообразия техногенных образований, получаемых в металлургическом производстве черных металлов, основной объем (свыше 80%) составляют шлаковые отвалы [1]. В современном сталеплавильном производстве следует различать плавильные шлаки, образующиеся в электродуговой печи и рафинировочные шлаки агрегата «печь-ковш».

В таблице 1 приведены усредненные составы печных и рафинировочных шлаков [2].

Таблица 1 – Усредненные химические составы печных и рафинировочных шлаков сталеплавильного производства [2]

| Вид шлака      | Химический состав шлаков, масс. % |                  |                                |           |          |          |                               |           |
|----------------|-----------------------------------|------------------|--------------------------------|-----------|----------|----------|-------------------------------|-----------|
|                | CaO                               | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO       | MgO      | MnO      | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | S         |
| Печной         | 15,0-31,0                         | 6,4-19,2         | 2,5-8,0                        | 19,7-53,2 | 4,2-10,1 | 4,3-8,8  | 0,14-0,47                     | 0,05-0,27 |
| Рафинировочный | 38,7-59,6                         | 8,7-20,3         | 16-38,8                        | 0,3-2,2   | 4,7-12,1 | 0,08-5,3 | 0,05-0,15                     | 0,24-2,5  |

По данным качественного рентгенофазового анализа [2] в печных шлаках фиксируются вюстит FeO, магнетит Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, мервинит C<sub>3</sub>MS<sub>2</sub> (3CaO·MgO·2SiO<sub>2</sub>) и высокотемпературная модификация белита - ларнит β – C<sub>2</sub>S (β - 2CaO·SiO<sub>2</sub>). Рафинировочные шлаки содержат три основные фазы: майенит C<sub>12</sub>A<sub>7</sub> (12CaO·7Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), периклаз MgO и низкотемпературную модификацию белита - шеннонит γ – C<sub>2</sub>S (γ - 2CaO·SiO<sub>2</sub>). Фазовый состав шлаков определяет их физико-механические свойства и пригодность к дальнейшей переработке.

Переработка рафинировочных шлаков представляет более сложную задачу ввиду наличия в их составе значительного количества низкотемпературной модификации белита  $\gamma - C_2S$  - шеннонита, образующегося вследствие сложных полиморфных превращений высокотемпературных модификаций белита ( $\alpha - C_2S$ ,  $\alpha - C_2S$  и  $\beta - C_2S$ ) при охлаждении шлака до  $830\text{ }^{\circ}\text{C}$ , сопровождающихся увеличением объема и распадом шлака на пылевидные фракции. Это препятствует их массовой переработке в шлаковый щебень и вызывает загрязнение окружающей среды пылевыми выбросами на месте складирования этих шлаков. Для реализации массовой переработки таких шлаков в мировой практике используются четыре основных способа их стабилизации: боратная, неборатная, термическая и химическая [2, 3].

По мнению авторов работы [2] первые три способа направлены на стабилизацию только одной фазы рафинировочного шлака, являющейся причиной его распада - белита, однако в условиях восстановительной рафинировочной плавки в присутствии FeO ион  $Fe^{2+}$  может изоморфно замещать  $Ca^{2+}$  в структуре  $C_2S$  и стабилизировать низкотемпературную модификацию  $\gamma - C_2S$ , что может служить основной причиной распада шлака, снижающей эффективность добавок, стабилизирующих высокотемпературные модификации  $C_2S$ .

Четвертый, химический способ стабилизации рафинировочного шлака является наиболее перспективным и может быть реализован при смешивании печного и рафинировочного шлака с небольшим количеством корректирующих добавок. Рафинировочный шлак содержит значительное количество оксидов кальция и алюминия, но малое количество оксидов железа. Печные шлаки наоборот содержат значительное количество оксидов железа, но мало оксидов кальция и алюминия. При смешивании шлаков в жидком состоянии с небольшим количеством корректирующих добавок можно сформировать фазы портландцемента клинкера с высокой гидравлической активностью при низких затратах и сохранении вязкости, поскольку оксиды железа являются сильнейшими флюсующими добавками. В результате такого смешивания получается шлак следующего фазового состава, масс. %: 31,5  $C_3S$ ; 6,2  $C_2S$ ; 43,6  $C_4AF$ ; 18,7 стеклофазы [2]. Фазовый состав полученного шлака характеризуется наличием в нем активных клинкерных минералов алита  $C_3S$ , браунмиллерита  $C_4AF$  и значительного количества стеклофазы.

Для предотвращения возникновения в твердеющих изделиях опасных напряжений, авторы работы [2] предлагают вводить в сырьевую смесь добавки, вызывающие раннюю гидратацию периклаза, а вяжущую систему формировать по принципу гипсоцементно-пуццолановых вяжущих. В качестве дигидрата сульфата кальция в вяжущее могут вводиться природный гипс, фторангидрит, фосфогипс, а в качестве добавки с пуццолановыми свойствами - известняк или мрамор, кислый шлак электросталеплавильного производства, красный шлам, а в качестве активатора гидратации переклаза - бишофит, сернокислый магний. В результате было разработано вяжущее на основе шлака, которое используется для изготовления перегородочных пазогребневых плит, соответствующих высшей категории качества по ГОСТ 6428 «Плиты гипсовые для перегородок. Технические условия».

Известно [4], что большинство основных шлаков, содержащих более 45 % CaO и менее 8 %  $Al_2O_3$  при медленном охлаждении склонно к силикатному распаду и превращению в порошок, что осложняет их переработку и использование. Однако при этом следует учитывать комплекс физико-химических процессов, сопровождающих охлаждение, кристаллизацию шлака и полиморфное превращение двухкальциевого силиката, которое приводит к формированию в воздушно-сухих условиях напряженной, потенциально способной к дальнейшим превращениям структуры. Количество двухкальциевого силиката зависит от состава шлака. По разным источникам распад происходит при колебании доли двухкальциевого силиката от 1 до 25 % и более. Высокие технологические свойства получаемого тонкодисперсного шлака позволяют с высокой эффективностью использовать его при производстве портландцементных вяжущих, силикатных бетонов, керамических изделий и т.д.

В работе [4] установлено, что технологические свойства высокоосновных шлаков, полученных по воздушно-сухой технологии, выше, чем шлаков гидравлического охлаждения.

Во-первых, такие шлаки имеют четкую мелкокристаллическую структуру с размером частиц 10-50 мкм, нулевую влажность и легко подвергаются магнитной и воздушной сепарации для отделения металла, в то время как для переработки шлаков гидравлического охлаждения необходимо создание сложной технологической схемы, включающей сушку и измельчение шлака с последующей многоступенчатой магнитной сепарацией. Шлак гидравлического охлаждения имеет рыхлую тонкодисперсную структуру с размером частиц 1-10 мкм. Во-вторых, эффективность применения шлаков воздушного охлаждения для производства строительных материалов (керамических изделий и силикатных бетонов) выше, чем при использовании шлака гидравлического охлаждения. В-третьих, капитальные вложения в эксплуатационные затраты при организации воздушной переработки высокоосновных шлаков могут быть существенно ниже, чем при гидравлическом охлаждении и организации дальнейшей переработки с использованием ряда дробильно-сортировочных стадий, магнитной сепарации и т.д.

На ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат» разработана технология первичной переработки высокоосновных шлаков с использованием передвижной установки, способной осуществлять не только сбор тонкодисперсного шлака с поверхности шлаковой ямы, но и его эффективную воздушную сепарацию [4]. Экспериментально установлено, что уже через одни сутки после слива шлакового расплава слоем толщиной 0,2-0,3 м происходит его естественное охлаждение, сопровождающееся саморассыпанием застывшего шлакового монолита в тонкодисперсный порошок, для которого возможен сбор и сепарация.

Переработка сталеплавильных шлаков в будущем должна осуществляться непосредственно за сталеплавильным агрегатом в специальных установках. При этом извлекается металлическая составляющая, которая может быть использована повторно как шихтовой материал, и получается товарный продукт для дорожного строительства, производства цемента и бетонов, укрепления грунтов и балластирования железнодорожных путей, улучшения кислотного состава сельскохозяйственных почв. Тем самым минимизируются площади под отходы металлургического производства, и не происходит образования шлаковых отвалов, ухудшающих экологическую обстановку.

Одно из перспективных решений – переработка шлака в расплавленном состоянии в агрегатах с шаровой насадкой с целью производства кондиционного инертного наполнителя для дорожного строительства. В 1998 г. на комбинате «Баостил» (КНР) был успешно пущен в работу прототип такой установки и, тем самым, впервые в мире показаны эффективность переработки жидких шлаков в установках с колосниковым барабаном с шаровой насадкой и промышленная перспективность предложенного решения. Развивая это направление корпорация «Баостил» успешно внедрила подобное оборудование в Индии и Южной Корее [5].

В основе создания установок для переработки жидкого шлака лежит идея охлаждения расплава на движущейся металлической поверхности с использованием пространства, образованного металлическими шарами, находящимися в емкости. При вращении емкости расплавленный шлак, проникая в межшаровое пространство, оказывается окруженным со всех сторон металлом, быстро отдает ему тепло, переходит в пиропластичное состояние, изменяется, а затем в твердом состоянии удаляется из емкости через колосники [5, 6].

Внедрение в сталеплавильное производство, такой технологии и оборудования переработки шлаковых расплавов обеспечит получение новых высокоэффективных видов продукции для строительной индустрии, существенное сокращение потерь металла с отходами в сталеплавильном производстве, снижение его энергоемкости, улучшит экологическую обстановку за счет исключения образования шлаковых отходов.

Авторы работы [7] проводили переработку рафинировочных и электропечных шлаков в условиях электросталеплавильного цеха Ревдинского метизно-металлургического завода по обычной технологии и с использованием барабанной установки с шаровой насадкой. Результаты испытаний представлены в таблице 2.

Результаты исследований подтвердили реализацию процессов физической стабилизации рафинировочного шлака при охлаждении его в барабанной установке. Получение устойчивой структуры рафинировочного шлака улучшает его потребительские свойства и в окускованном виде он может быть использован в качестве флюсующей добавки в электродуговых печах.

Металлургические шлаки – ценное сырье для производства широкого ассортимента материалов для промышленности, жилищного и дорожного строительства. Качество продукции, полученной из шлаков, по физико-механическим свойствам не только не уступает, но в ряде случаев и превосходит материалы на основе природного сырья. Однако в промышленном производстве используется, например, только около 10 % всех образующихся сталеплавильных шлаков. Причин этого множество, но одной из самых главных можно считать низкий технологический уровень шлакопереработки [4].

Таблица 2 – Результаты испытаний ковшовых (рафинировочных) и печных шлаков [7]

| Параметр  | Шлак рафинировочный    |  | Шлак печной            |                            |
|---|------------------------|--|------------------------|----------------------------|
|   | охлаждение в установке | обычный вариант охлаждения                     | охлаждение в установке | обычный вариант охлаждения |
| Гранулометрический состав, % при ячейках сита, мм               |                        |  |                        |                            |
| > 120   | –                      | –  | –                      | 24 – 30                    |
| > 70  | –                      | 1 – 3  | –                      | 16 – 18                    |
| > 40  | –                      | 2 – 6  | –                      | 15 – 19                    |
| > 20  | 1,08                   | 2 – 4  | 5,5                    | 8 – 12                     |
| > 10  | 4,75                   | 3 – 5  | 23,32                  | 6 – 9                      |
| > 5   | 26,15                  | 5 – 8  | 26,15                  | 9 – 12                     |
| > 2,5   | 32,15                  | 4 – 7  | 20,95                  | 5 – 7                      |
| 0 – 2,5   | 43,22                  | 69 – 83  | 24,08                  | 3 – 7                      |
| Модуль крупности зерен шлака < 5 мм                             | 3,51 (крупный)         | –  | 3,83 (крупный)         | –                          |
| Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>                           | 1240                   | 1120   | 1747                   | 1780                       |
| Влажность, %  | 4,78                   | 0,56   | 4,02                   | 2,60                       |
| Устойчивость структуры (потеря массы пробы, %, после испытаний) | УСЗ<br>6,8             | Распадающийся в процессе охлаждения на 85-90 % | УСЗ<br>6,0             | УСЗ<br>6,3                 |

#### Список использованных источников

1. Демин, Б.Л. Техногенные образования из металлургических шлаков как объект комплексной переработки / Б.Л. Демин, Ю.В. Сорокин, А.И. Зимин // Сталь. – 2000. – № 11. – С. 99 – 101.
2. Технологические особенности переработки шлаков ДСП и АКП в строительные материалы и опыт утилизации рафинировочного шлака в ОАО СТЗ / Л.И. Леонтьев [и др.] // Сталь. – 2014. – № 6. – С.106 – 109.
3. Технологические решения по переработке самораспадающихся шлаков / Б.Л. Демин [и др.] // Фундаментальные основы технологий переработки и утилизации техногенных отходов: труды международного конгресса. – Екатеринбург, 2012. – С. 236 – 240.
4. Совершенствование технологии первичной переработки металлургических шлаков, склонных к силикатному распаду / В.А. Федосеев [и др.] // Сталь. – 2001. – № 12. – С. 77 – 80.
5. Охлаждение и кристаллизация шлакового расплава в межшаровом пространстве / А.Г. Шакуров [и др.] // Сталь. – 2012. – № 5. – С. 19 – 22.

6. Предпосылки и концепция создания энергометаллургических комплексов для переработки техногенных отходов / К.Л. Косырев [и др.] // Экология и промышленность России. – 2013. – июль. – С. 4 – 10.

7. Переработка шлаков ЭСПЦ в опытной установке барабанного типа с шаровой насадкой / Ю.В. Сорокин [и др.] // Сталь. – 2012. – № 3. – С. 70 – 73.

УДК 621.74.047

### **Анализ технологических и теплофизических параметров процесса полунепрерывного литья, влияющих на качество отливок**

Студенты гр. 104 111 Сытько Т.А., Матюшенко С.А.  
Научный руководитель – Довнар Г.В.  
Белорусский национальный технический университет  
г. Минск

Сущность непрерывного литья: заключается в получении непосредственно из расплава заготовок большой длины постоянного поперечного сечения. Непрерывное литьё предполагает разливку расплава в узел формирования отливки, из которого последняя вытягивается с помощью специального механизма. Полунепрерывное литьё является разновидностью способа, при котором после вытягивания заготовки требуемой длины, все механизмы возвращаются в исходное положение.

Параметры влияющие на качество отливок при полунепрерывном литье:

1. жидкотекучесть;
2. температура заливки;
3. литниковая система;
4. химический состав;
5. конструкция кристаллизатора

#### *Жидкотекучесть.*

Чугун, заливаемый в металлический водоохлаждаемый кристаллизатор, особенно для получения тонкостенных изделий, должен обладать повышенной жидкотекучестью при умеренных температурах заливки.

Положительное влияние степени эвтектического чугуна на литейные свойства объясняется минимальной и постоянной температурой плавления. В этом случае резко сокращаются ликвационные явления, повышается жидкотекучесть, и возрастает плотность отливок.

На жидкотекучесть также оказывает влияние окисленная пленка, образующаяся на открытой поверхности жидкого металла. В основном окисляется хром, марганец, кремний, железо и титан.

#### *Температура заливки.*

Для труб малого диаметра, толщина стенок которых составляет 8 – 10 мм, оптимальное значение температуры заливки находится в пределах 1280– 1300°С. Трубы с более толстой стенкой (12 – 15 мм) заливаются при 1270 – 1290°С. Нижний предел температуры заливки 1260°С может быть рекомендован для отливки труб большого диаметра с толщиной стенки 16 мм и более.

При заливке труб при более высоких температурах (>1300°С) были случаи прорыва затвердевшей корки с вытеканием жидкого металла, что приводило к необходимости снижения скорости извлечения. Низкая температура заливки значительно ухудшает условия протекания металла через литниковую чашу. В этом случае, как правило, ухудшается качество поверхности труб, а по толщине стенки наблюдается повышенное количество неслитин, газовых раковин и высокая пористость.