

В статье описаны преимущества процесса диффузионного раскисления стали 20ГФЛ для вагонных отливок дисперсным раскислителем диффузионным алюмосодержащим (РДА). Применение РДА позволило более эффективно рафинировать металл, повысить и стабилизировать ударную вязкость стали при отрицательных температурах, а также снизить себестоимость отливок. Технологический процесс освоен в Рубцовском филиале АО «Алтайвагон» с экономическим эффектом ~ 6 млн руб.

### Ключевые слова

Сталь, шлак, статистическая обработка, модифицирование, диффузионное раскисление.

### АННОТАЦИЯ

### SUMMARY

The article describes benefits of the technological process for the diffusive deoxidizing of steel 20GFL for wagon casting production with the help of a dispersive diffusive aluminum deoxidizer. The application of REM (rare earth metals) allowed to refine the metal more effectively, to increase the stability of the toughness of steel with an acute cut at the negative temperature, and to reduce the cost of castings. The described technological process has been implemented at the AO «Altayvagon» Rubtsov branch.

### Key words

Steel, slag, statistical analysis, inoculants, defusive deoxidizing.

УДК 621.74.94: 669.141.25

- А.В. Чайкин, В.А. Чайкин, В.В. Колпаков, Д.В. Маслов, Е.П. Закоптелов
- A.V. Chaikin, V.A. Chaikin, V.V. Kolpakov, D.V. Maslov, E.P. Zakoptelov

## Применение дисперсных раскислительных смесей для повышения качества стали 20ГФЛ

## Applying dispersive deoxidizing mixtures for increase of steel 20GFL qualitative indicators

### Введение

В сталелитейном цехе Рубцовского филиала АО «Алтайвагон» производят стальные вагонные литые заготовки: *раму боковую, балку надрессорную*. Анализировали качественные показатели сталей, выплавленных с применением разных технологий восстановительного периода. Отливки *рама боковая* и *балка надрессорная* изготавливают из стали 20ГФЛ по ГОСТ 32400-2013 «Рама боковая и балка надрессорная литых тележек грузовых вагонов. Технические условия». Химсостав стали 20ГФЛ, %: С – 0,17...0,25; Si – 0,30...0,50 Mn – 0,9...1,4; V – 0,07...0,13; Al – 0,02...0,06; S ≤ 0,02; P ≤ 0,02; Cr ≤ 0,3; Ni ≤ 0,3; Cu ≤ 0,6. Механические свойства стали 20ГФЛ:  $\sigma_{0,2} \geq 343$  МПа;  $\sigma_b \geq 510$  МПа;  $\delta \geq 18\%$ ;  $\psi \geq 30\%$ ;  $KCV^{-60} \geq 200$  кДж/м<sup>2</sup>.

До применения РДА металл рафинировали во время восстановительного периода смесью, которую готовили сами сталевары и подавали на шлак до достижения удовлетворительной раскисленности шлака и металла. Массовая доля закиси Fe в шлаке после рафинирования должна быть ≤ 1%. Шлак должен рассыпаться в белый порошок. Смесью состояла из ферросилиция ФС-75 (фракция до 3,2 мм), коксовой мелочи размерами кусков до 10 мм и Al-крупки фракцией до 10 мм, в количестве 4,24 кг на 1 т жидкой стали, что не обеспечивало равномерного распределения материалов в составе при перемешивании и, как следствие, во время рафинирования шлака компоненты реагировали не одновременно.

но и не равномерно по всему объему шлака, что должно исключить применение РДА.

Работа посвящена совершенствованию технологического процесса восстановительного периода плавки стали 20ГФЛ для повышения эффективности рафинирования и снижения себестоимости отливок из стали. Взамен раскислительной смеси, используемой на заводе, применили РДА – 2,37 кг на 1 т жидкой стали. РДА разработан и производится ООО «Металлург» СРО РАЛ по ТУ 0826–003–47647304–2001. Основное отличие материала – в высокой дисперсности его компонентов, что придает смеси новые свойства.

### Методика исследований

Сталь 20ГФЛ выплавляли в печах ДСП-6. Во время окислительного периода Р удалялся. Сразу после расплавления металла и шлака печь наклоняли в сторону рабочего окна и проводили скачивание шлака. Если этого оказывалось недостаточно для снижения содержания Р в стали до требуемой величины, наводили новый высокоосновный шлак и проводили рудный кип, после чего шлак повторно удаляли.

В восстановительный период плавки проводили десульфурацию расплава и доводили металл по химсоставу. Диффузионное раскисление в печи производили смесью РДА после наведения высокоосновного шлака с основностью > 2 до получения шлака, рассыпающегося в порошок (белого или светло-серого цвета). Затем металл выпускали в 8-т ковш, где с помощью двухручьевого трайб-аппарата производили окончательное раскисление стали Al-проволокой и модифицирование порошковой проволокой INSTEEL®1,5.

Химсостав стали определяли традиционным методом. На полученных заливкой в сухие стержневые формы образцах определяли тип неметаллических включений (НМВ) и индекс загрязненности ими стали.

Для обеспечения максимального модифицирующего эффекта при ковшовой обработке сталей модификатором INSTEEL®1,5 последний должен присаживаться в предварительно хорошо раскисленный и подвергнутый десульфурации металл. Операции внепечной обработки плохо раскисленного металла с повышенным содержанием S вызывают перерасход модификатора, так как активные элементы модификатора вначале будут взаимодействовать с кислородом и серой расплава.

Отличительная особенность диффузионного раскисления – участие шлаковой фазы в металлургических процессах восстановления оксидов. Первоочередная задача заключается в связывании S и восстановлении оксидов Fe в шлаке.

Если уменьшить концентрации оксидов в шлаке, начнется диффузионный переход кислорода и серы из металла в шлак, т.е. рафинирование металла. В связи с этим проведены работы по испытанию и применению РДА для сталей. РДА применили взамен традиционных смесей, состоящих из Al-крупки, ферросилиция ФС-75 и коксика. РДА – это смесь порошков C-, Si- и алюмосодержащих материалов.

Основное отличие порошков в том, что они получены физико-химическим путем и обладают высокой дисперсностью, что придает смеси новые свойства. Кроме того, в состав смеси введено оптимальное количество поверхностно активных веществ, состоящих из Ca–Sr-карбоната, соединений K и Na, которые придают ей жидкоподвижность и еще больше активизируют<sup>1</sup>.

Основная и важнейшая особенность дисперсного состояния в том, что значительная доля свободной энергии системы сосредоточена в межфазных поверхностных слоях, и ее избыток делает дисперсные системы термодинамически неустойчивыми.

При подаче РДА на шлак дисперсные компоненты смеси способствуют равномерному распределению материала по поверхности шлака за короткий промежуток времени. Карбонаты Ca и Sr, входящие в состав смеси, мгновенно диссоциируют на CaO, SrO и CO<sub>2</sub>. Оксиды Ca и Sr повышают основность и сульфидоёмкость шлака; CO<sub>2</sub> способствует перемешиванию РДА со шлаком, а входящие в состав РДА соединения Na, K и оксиды Al разжижают шлак и делают его реакционноспособным.

Кроме того, дисперсный C-содержащий материал дополнительно вспенивает шлак, за счет протекания реакции восстановления оксидов из шлака. Вспененный жидкоподвижный шлак экранирует дуги, способствует быстрому нагреванию шлака и металла, что создает идеальные условия для дальнейшего протекания реакций десульфурации, восстановления оксидов Fe и

<sup>1</sup> Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Пивоварова К.Г. и др. Флюсы для электрошлакового переплава конструкционных сталей // Электрометаллургия. – 2017. – №4. – С. 13–19.





Mn из шлака присутствующими в РДА алюминием и кремнием.

Таким образом, сокращается время восстановительного периода, экономится электроэнергия. Образующийся  $Al_2O_3$  продолжает разжигать шлаки и повышать их основность.

В результате раскисления оксиды Fe и Mn восстанавливаются в шлаке и, согласно закону распределения, переходят в металл, а из металла в шлак уходят FeO и MnO, где восстанавливаются РДА. Сульфиды также переходят в шлак согласно закону распределения. В стали снижается содержание оксидов и серы. За счет уменьшения в стали НМВ и оксидных плен повышаются механические свойства и жидкотекучесть расплава.

### Результаты исследований

Произведена статистическая обработка химсостава стали 20ГФЛ разных плавков. Исследовали 100 плавков стали, проведенных с использованием традиционной раскислительной смеси, и 173 – с использованием РДА. Результаты статистической обработки показали, что усредненный химсостав сталей до и после использования РДА соответствовал рекомендуемому ГОСТ 32400-2013. Элементы в стали, которые обеспечивают расчетные добавки ферросплавов, достаточно однородны.

Распределение Mn стремится к нормальному, что свидетельствует о высокой однородности его содержания в сталях. Наиболее стабильны – содержания С и Mn. После использования РДА существенно стабилизировались концентрации V и Са в расплаве. Следует отметить, что концентрации Р в сталях находятся на низком уровне в обоих случаях, что свидетельствует о качественно проводимых окислительных периодах плавков.

В целом, полученный в результате плавки химсостав стали 20ГФЛ свидетельствует о высокой профессиональной подготовке сталеваров и удовлетворительной технологической дисципли-

не на участке плавки. Это позволило обеспечить высокие механические свойства стали. Среднее значение  $KCV^{60}$  было равно (до внедрения)  $301,48 \text{ кДж/м}^2$ , что на 33% выше требуемого ГОСТ 32400-2013.

На качество металла решающее влияние оказывает восстановительный период плавки. Велико влияние шлаков на конечный результат плавки. Они должны быть высокоосновными и рассыпаться в белый порошок с содержанием  $FeO \leq 1\%$ . Чем меньше оксидов Fe в шлаке, тем меньше их будет и в металле.

Оптимальной оказалась присадка РДА в 2,37 кг на 1 т жидкой стали. После присадки РДА происходило интенсивное раскисление и разжижение шлака, сопровождавшееся его вспениванием, о чем свидетельствовала стабилизация горения дуг, которое характеризовалось равномерным и тихим гудением.

После окончания реакции визуально шлак был жидкоподвижным и реакционноспособным. После обработки шлаков РДА производили отбор проб шлака на анализ. Шлак был белого цвета и в процессе охлаждения рассыпался в белый порошок. Пробы шлака одной из плавков приведены на **рисунке**.

Химсостав шлаков, % (в числителе – до, знаменателе – после обработки): FeO – 4,4/0,4;  $SiO_2$  – 23,3/26,1;  $Al_2O_3$  – 1,6/2,2; CaO – 48,6/56,7; MgO – 6,4/5,3; MnO – 11,6/1,1; основа – 2,36/2,37.

Как видим, шлак до обработки РДА содержал большое количество FeO (4,4%) и MnO (11,6%), что и обусловило его черный цвет (**рисунок, а**). После обработки содержание FeO и MnO в шлаке резко уменьшилось, что свидетельствует о высокой эффективности РДА, концентрация FeO и MnO в шлаке снизилась на 90%. Соответственно, концентрации этих оксидов уменьшились и в металле, что повысило его механические свойства и появилась возможность экономить Mn-содержащие ферросплавы.

Поскольку на заводе нет возможности проводить химический анализ шлаков каждой плавки, проводили визуальный контроль качества шлаков в присутствии контролеров. Все шлаки рассыпались в белый или светло-серый порошок, что свидетельствовало о качественном проведении восстановительного периода (**рисунок, б**).

Способствуя снижению концентрации FeO, применение РДА положительно сказывается на процессе десульфурации расплава, для чего необходимы высокие основность, жидкоподвижность

и реакционная способность шлаков, а также высокая температура процесса и низкая концентрация FeO. Все эти условия обеспечивает применение РДА в качестве диффузионного раскислителя, что подтверждается результатами статистического анализа, которые показали, что среднее значение концентрации S в расплаве снизилось с 0,0143 до 0,0110%, т.е. на 23%. Соответственно, все это сказалось и на механических свойствах стали: средние значения KCV<sup>60</sup> выросли с 301 до 310 кДж/м<sup>2</sup>.

Это объясняется благоприятным влиянием рафинирования РДА на микроструктуру стали. Исследованию подвергались микрошлифы без предварительного травления. По результатам металлографического анализа НМВ выявлено, что морфология и типы включений не изменились, в основном – это оксисульфиды 3-го типа. Вместе с тем, микроструктура стали стала чище по НМВ. Индекс загрязненности, в среднем, уменьшился с 1,853 до 1,472. Результаты свидетельствуют об эффективности действия нового материала, что позволило освоить его применение в производстве.

Установлено, что применение РДА не требует дополнительной подготовки. Смесь поступает к заказчику в готовом виде. Она фасуется в пакеты по 3 кг, что позволяет снизить трудоемкость ручного труда сталеваров при проведении диффузионного раскисления, экономично и равномерно распределить смесь по поверхности шлака и наладить контроль за рациональным расходом материала, что является важным преимуществом материала. ФС-75, Al-крошка были исключены из процесса диффузионного раскисления. Средний расход РДА за данный период составил 2,37 кг/т жидкой стали (расход смеси, применяемой ранее, составлял 4,24 кг/т). Экономический эффект составил ~ 6 млн руб.

### Выводы

- Исследовали и освоили в производстве технологию диффузионного раскисления стали РДА, обладающей уникальными физико-механическими, технологическими и функциональными свойствами, отличительным признаком которой является дисперсность компонентов.

- Установлено, что обработка стали РДА позволила повысить эффективность ее раскисления, по сравнению с традиционными смесями, за счет существенного увеличения в системе количества активных центров реагирующих частиц и межфазной поверхности, принудительного перемешивания шлаков из-за диссоциации карбонатов. Среднее содержание S при раскислении РДА снизилось на 23% – до 0,0110, против 0,0143% при применении заводской смеси.

- После обработки стали РДА микроструктура отливки стала более благоприятной. Индекс загрязненности, в среднем, уменьшился с 1,853 до 1,472. KCV<sup>60</sup> после использования РДА несколько увеличился и существенно стабилизировался.

- Использование технологии раскисления стали РДА обеспечило экономический эффект ~ 6 млн руб.

### Сведения об авторах

**Чайкин Андрей Владимирович** – канд. техн. наук, техн. директор смоленского регионального отделения РАА, г. Сафоново. Тел.: +7(926)1049143. E-mail: chaika1983@inbox.ru

**Чайкин Владимир Андреевич** – д-р техн. наук, проф. кафедры «Технологии металлургических и литейных процессов» ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Тел.: +7(910)7868292. E-mail: stro\_ral@mail.ru

**Колпаков Владислав Васильевич** – гл. металлург Рубцовского филиала АО «Алтайвагон». Тел.: +7 (929)3950306. E-mail: metal@rfav.ru

**Маслов Дмитрий Викторович** – инж.-технолог, там же. Тел.: +7 (913) 2741945. E-mail: metal@rfav.ru

**Закоптелов Евгений Петрович** – инж.-технолог, там же. Тел.: +7 (923)3645477. E-mail: metal@rfav.ru