

3. Рафальский, И.В. Ресурсосберегающий синтез сплавов на основе алюминия с использованием дисперсных неметаллических материалов и интеллектуальные методы контроля металлургических процессов их получения / И.В. Рафальский. – Минск: БНТУ, 2016. – 308 с.

4. Рафальский, И.В. Расчет содержания твердой фазы, выделяющейся при затвердевании расплава / И.В. Рафальский, П.Е. Луцкич // «Металлургия: технологии, инновации, качество»: тр. XX Международ. науч.-практ. конф., Ч. 2. 15–16 ноября 2017 г. / Под ред. Е.В. Протопопова; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк, 2017. – С. 196–200.

5. Gibbs, J.W. Solid fraction measurement using equation-based cooling curve analysis / J.W. Gibbs, P.F. Mendez // Scripta Materialia. – 2008. – Vol. 58. – PP. 699–702.

6. Marchwica, P. Fraction solid evolution characteristics of AlSiCu alloys - dynamic baseline approach / P. Marchwica, J.H. Sokolowski, W.T. Kierkus // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2011. – Vol. 47, No 2. – PP. 115–136.

7. Djurdjevic, M.B. Characterization of the Solidification Path of AlSi5Cu (1–4 wt.%) Alloys Using Cooling Curve Analysis / M.B. Djurdjevic, Z. Odanovic, N. Talijan // the Journal of the Minerals, Metals & Materials Society. – 2011. – Vol. 63, No. 11. – 51–57.

8. Quantification of the microconstituents formed during solidification by the Newton thermal analysis method / H. Cruz [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – Vol. 178. – PP. 128–134.

УДК 669.18.046.546.2

С.В. КОРНЕЕВ, канд. техн. наук,
И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук (БНТУ)

ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Для оптимизации режимов внепечной обработки стали необходимо решить следующие задачи, а именно определить:

1) требования к содержанию вредных примесей;

2) технологические приемы, позволяющие снизить содержание вредных примесей до необходимого уровня;

3) возможный уровень вредных примесей для заданных условий на конкретном этапе обработки;

4) установить кинетику удаления примесей.

Внепечная обработка является составной частью комплексной технологии получения стали, поэтому качественные показатели готовой стали будут в первую очередь определяться характеристиками полупродукта, полученного на этапе выплавки.

На рисунке 1 показана взаимосвязь получения стали высокого качества с характеристиками процесса на каждом из предыдущих этапов.

Рациональной технологической схемой получения стали принимается такая схема шихтовки, плавки и обработки жидкого металла, которая позволяет получить необходимый состав, получить гарантированные требуемые качественные показатели по виду и количеству неметаллических включений, газов и других примесей при минимальных затратах на тонну готовой стали.

При этом существует несколько подходов к выбору маршрута технологической обработки:

1) использование максимально чистой металлошихты с большим перегревом в печи и минимальной обработки расплава в виде проливки, легирования и обработки порошковыми материалами;

2) использование металлошихты с нестабильными качественными показателями;

3) использование в металлошихте определенной доли металлizedованного сырья;

4) использование 100 % металлizedованного сырья.

При выборе указанных маршрутов затраты могут смещаться в сторону увеличения затрат на выплавке или при внепечной обработке.

Очевидно, что в процессе внепечной обработки необходимо одновременно решать несколько задач по удалению вредных примесей (серы, вредных газов и неметаллических включений). При этом суммарная продолжительность внепечной обработки при необходимости получения металла требуемого качества будет определяться общим временем отдельных процессов, которые могут протекать как последовательно (друг за другом), так и одновременно.

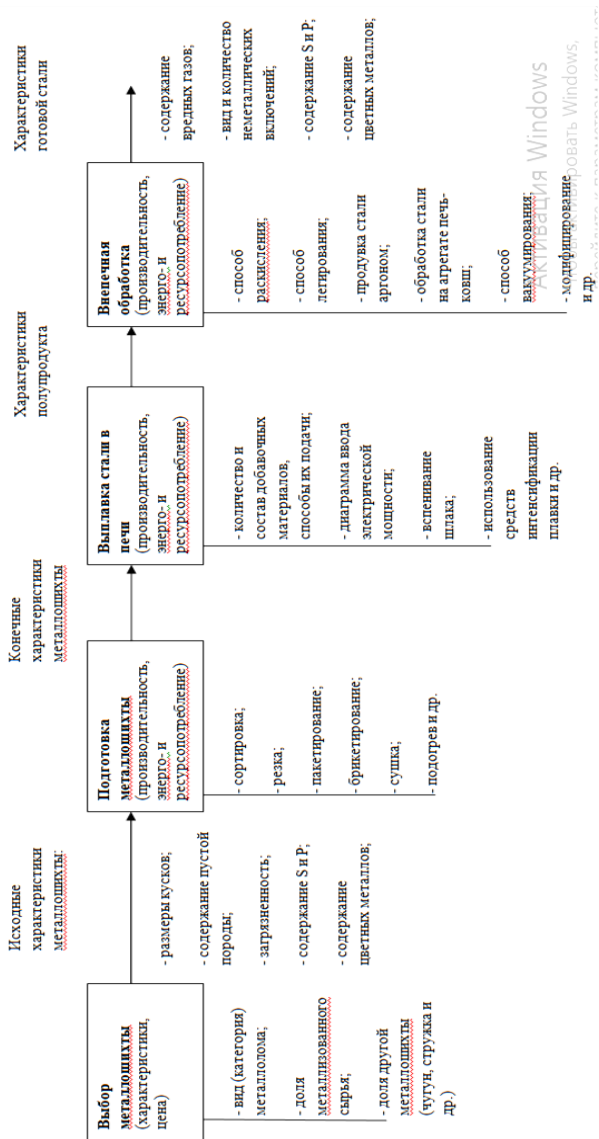


Рисунок 1 — Технологическая схема получения стали

Для оптимизации процесса наиболее целесообразно использовать критерий минимума затрат на обработку при условии получения выходных качественных показателей. При этом затраты зависят как от количества и вида применяемых материалов, затрат на энергоносители, так и от производительности установки внепечной обработки.

Таким образом, условия оптимизации будут выглядеть следующим образом:

- 1) общее время обработки $\tau \rightarrow \min$.
- 2) общая стоимость обработки $z \rightarrow \min$.

Помимо затрат на материалы при увеличении количества шлака возрастают энергетические затраты на его расплавление. При этом время обработки связано со временем расплавления шлакообразующих, скоростью нагрева металла и кинетикой удаления примесей.

Рассмотрим данный подход на примере удаления серы.

Конечное содержание серы после обработки на агрегате печь-ковш определяется

$$S_{fin}^{LF} = (S_{in} - S_{равн}) \cdot e^{-k_{LF} \cdot \frac{A}{V} \cdot \tau} + S_{равн},$$

где S_{in} – начальное содержание серы; $S_{равн}$ – равновесное содержание серы; A – площадь поверхности границы металл-шлак; V – объем обрабатываемого металла; k_{LF} – константа скорости десульфурации при обработке на агрегате печь-ковш; τ – время обработки.

Конечное содержание серы после обработки на ковшевом вакууматоре:

$$S_{fin}^{VD} = (S_{in} - S_{равн}) \cdot e^{-k_{VD} \cdot \frac{A}{V} \cdot \tau} + S_{равн}.$$

Равновесное содержание серы можно определить следующим образом:

$$S_{равн} = \frac{[\%S]}{1 + \frac{\eta_S \text{III}}{100}},$$

где [%S] – содержание серы перед внепечной обработкой; Ш – процент шлака от количества металла; $\eta_S = \frac{(\%S)}{[\%S]}$ – коэффициент рас-

пределения серы между металлом и шлаком в условиях равновесия.

Для определенных условий при крайне низких значениях FeO величина коэффициента распределения может составлять несколько сотен единиц.

При конкретной температуре и составе шлака коэффициент распределения серы можно определить, используя графические зависимости и номограммы. Например, в работе [1] приведена зависимость коэффициента распределения серы от содержания свободного CaO в шлаке и процентного содержания FeO. В работе [2] приведена номограмма для определения коэффициента распределения серы в зависимости от содержания CaO, SiO₂ в шлаке и Al в стали при постоянных значениях температуры (1600 °C), содержания MgO (7 %) в шлаке и [Si] в металле (0,2 %).

Используя данные о коэффициенте распределения, можно определить равновесное содержание серы при определенном количестве наводимого шлака.

На рисунке 2 приведена зависимость равновесного содержания серы в металле от коэффициента распределения серы между металлом и шлаком при начальном содержании серы в стали, равном 0,04 %, и разным количеством шлака.

Определив равновесное содержание серы, можно найти время обработки металла для достижения необходимого содержания серы.

Рассмотрим десульфурацию стали при перемешивании стали в ковшевом вакууматоре VD. Для быстрой десульфурации необходимо интенсивное перемешивание металла и шлака. Это достигается интенсивной продувкой аргоном при высоком уровне вакуума в ковшевом вакууматоре.

Константа скорости десульфурации k_S увеличивается довольно медленно при пониженных значениях ε , но быстро увеличивается, когда ε выше ~70 Вт/т. Выражения для k_S [3]:

$$k_S = 0,031 \cdot \varepsilon^{0,25} \text{ для } \varepsilon < 70 \text{ Вт/т};$$

$$k_S = 8 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon^{2,1} \text{ для } \varepsilon > 70 \text{ Вт/т}.$$

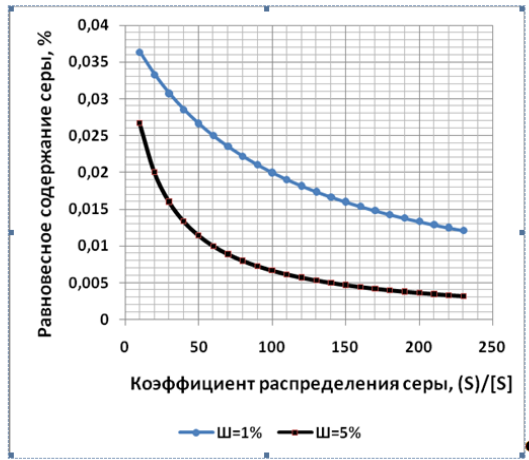


Рисунок 2 – Зависимость равновесного содержания серы в металле от коэффициента распределения серы между металлом и шлаком при начальном содержании серы в стали равном 0,04 % и разным количеством шлака

На рисунке 3 приведена иллюстрация зависимости константы скорости десульфурации от мощности перемешивания

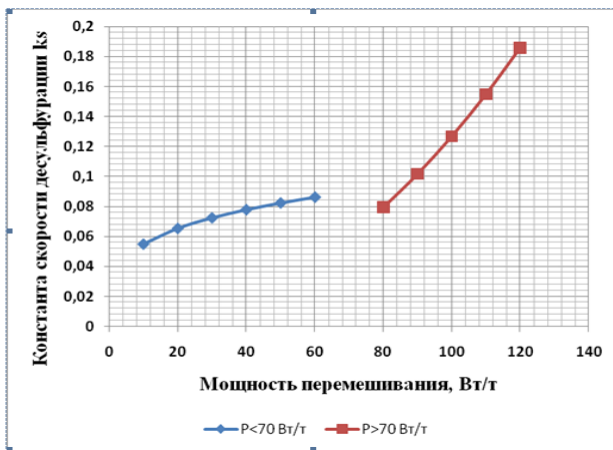


Рисунок 3 – Зависимость константы скорости десульфурации от мощности перемешивания

На рисунке 4 приведены кинетические кривые удаления серы при обработке стали в ковшевом вакууматоре при различной мощности перемешивания.

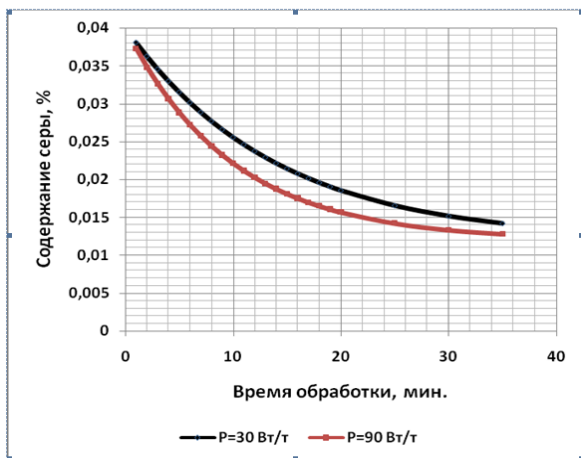


Рисунок 4 – Кинетика удаления серы при различной мощности перемешивания, при обработке стали на ковшевом вакууматоре ($\text{Ш} = 1 \%$, $\eta_s = 230$)

Например, при мощности перемешивания равной 30 Вт/т и конечном содержании серы не более 0,015 % данное содержание будет получено за время не менее 30 мин, а при мощности перемешивания 90 Вт/т – за время 23 мин.

Таким образом, имея результаты химического состава стали перед обработкой, и определив кинетику удаления серы и вредных газов, возможно определить лимитирующий время обработки процесс и скорректировать условия для конкретного варианта обработки, учитывая необходимость минимальных суммарных затрат финансовых средств на обработку.

Список литературы

1. **Zdeněk, Adolf.** Secondary Metallurgy / Zdeněk Adolf, Ladislav Socha // Technical University of Ostrava. – 2016. – 61 с.

2. Pistorius, Chris. Examples of How Fundamental Knowledge can Improve Steelmaking: Desulphurisation Kinetics Calcium and Modification / Chris Pistorius, Debduitta Roy, Neerav Verma // Technical paper // Received: 24 January 2013 /Accepted: 5 May, 2013. – Indian Institute of Metals, 2013.

3. Динамическая модель по внепечной обработке. Руководство пользователя 2004 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://steeluniversity.org>.

УДК 669.18-412

В.И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, д-р техн. наук,
И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук (БНТУ),
В.А. МАТОЧКИН, канд. техн. наук,
С.М. КАБИШОВ, канд. техн. наук (Минпром)

ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ШАРИКОПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ

Получение шарикоподшипниковых марок стали в большинстве своем осуществляется на заводах специальных сталей с последующей разливкой жидкой стали в крупные слитки. Ранее авторами совместно с д.т.н. Ю.А. Самойловичем были опубликованы материалы экспериментальных исследований разливки шарикоподшипниковой стали в крупные блюминговые слитки [1]. Вместе с тем, начиная с 1998 г., на Белорусском металлургическом заводе начато освоение стали марок ШХ15, ШХ15СГ для получения машиностроительных кругов диаметром 80–115 мм [2] по сквозной технологии, включая выплавку в ДСП-100, внепечную обработку стали на УВОС, разливку непрерывнолитых заготовок на МНЛЗ-2, нагрев и прокатку на стане 850*.

Одним из важнейших вопросов при получении заготовки требуемого качества является определение рациональных режимов раз-

* В разработке комплексной технологии принимали участие специалисты РУП «БМЗ» канд-ты техн. наук Филиппов В.В., Гуляев М.П., Фоменко А.П. и др.