

7. Манохин, А. И. Получение однородной стали / А. И. Манохин – М.: Металлургия, 1978.
8. Ефимов, В. А. Современные технологии разлива и кристаллизации сплавов / В. А. Ефимов – М.: Машиностроение, 1998.
9. Ефремов, Г. В. Управление процессом рафинирования стали в промежуточном ковше / Г. В. Ефремов // Сталь. – 2001. – №4.
10. Nakasima, H. Equipment and materials for tundish wet gunning / H. Nakasima // Refractories, 1995. – Vol. 47. – N 6. – P. 315–320.

УДК 669.187

В.И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, д-р техн. наук,
И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук,
П.Э. РАТНИКОВ, канд. техн. наук (БНТУ),
О.А. КОНДРАШЕВА (ДГТУ)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ НЕПРЕРЫВНОЙ ПОДАЧИ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ОКАТЫШЕЙ В РАСПЛАВ СТАЛИ ПРИ ПЛАВКЕ В ДСП МАЛОЙ ЕМКОСТИ

В настоящее время повышение качества выплавляемой стали в дуговых сталеплавильных агрегатах (особенно печах малой емкости машиностроительных производств) является весьма актуальной задачей. Вместе с тем все реконструктивные мероприятия связаны со значительными финансовыми издержками. Наименее затратный путь – переход к использованию современных шихтовочных материалов и совершенствование технологий плавки. Например, установка на печах малой емкости дозаторов непрерывного действия для подачи металлизированных окатышей не требует больших финансовых инвестиций, а применение высококачественного сырья в значительной мере повысит качество металла.

Как известно, металлизированные окатыши являются качественными шихтовочными материалами, имеющими известный химический состав, что во многом предопределяет получение высоко-

качественных марок стали. Подача металлизированных окатышей в дуговую сталеплавильную печь осуществляется двумя путями: 1) загрузочными бадьями вместе с остальной шихтой; 2) через загрузочное окно на зеркало жидкого металла. При этом на энерготехнологические показатели плавки (такие, как продолжительность плавки под током, расход электроэнергии и т.д.) существенно влияют следующие технологические параметры: объем металлизированных окатышей и скорость их подачи. Увеличение скорости подачи металлизированного сырья может приводить к так называемому эффекту «айсберга», когда будет происходить спекание отдельных кусков в довольно массивные глыбы и медленное их плавление в жидкой стали, что увеличивает продолжительность плавки.

В данной статье приведены расчеты по определению оптимальной скорости (расхода) непрерывной подачи металлизированных окатышей в расплав стали. Для установления скорости подачи металлизированного сырья в печь необходимо вначале определить время плавления отдельных кусков в расплаве жидкой стали. Для этого была использована математическая модель плавления кускового лома в расплаве [1–3].

Время прогрева, нагрева и плавления кускового материала в соответствии с используемой схемой термического слоя (рис.) имеет вид (в безразмерных величинах):

Продолжительность инерционного этапа

$$(0 \leq \tau \leq \tau_0, \beta_1(\tau) \leq \rho \leq 1)$$

$$\tau_0 = [1 - 0,15(\varepsilon_\lambda - \varepsilon_c)Ki] / 6. \quad (1)$$

Продолжительность регулярно-го этапа ($\tau_0 \leq \tau \leq \tau_2 = \tau_\Phi^0$); ($0 \leq \rho \leq 1$) определяется путем решения трансцендентного уравнения

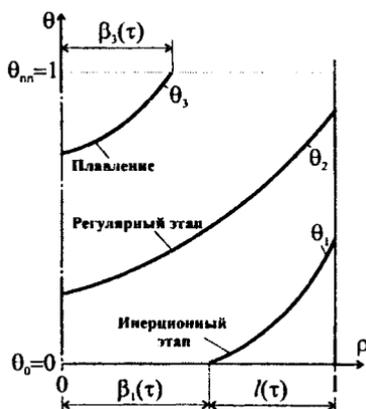


Рисунок — схема теплового пограничного слоя при расплавлении кускового материала

$$(1+m) \int_0^{\tau_\phi^0} \text{Ki}(\tau) d\tau \approx \frac{\varepsilon_\lambda}{\varepsilon_c} \left[\frac{(1+\varepsilon_\lambda)^2 - 1 + 2(1+\varepsilon_\lambda) \left(1 - \frac{\varepsilon_\lambda}{\varepsilon_c}\right)}{2\varepsilon_\lambda} - \text{Ki}(\tau_\phi^0)/3 \right] + \left(1 - \frac{\varepsilon_\lambda}{\varepsilon_c}\right) \text{Ki}(\tau_\phi^0)/6. \quad (2)$$

Продолжительность этапа плавления определяется из уравнения

$$\int_{\tau_\phi^0}^{\tau} \text{Ki}(\eta) d\eta + \text{Ko}\beta_3(\tau) + D = -\frac{(1+\varepsilon_c)\beta_3^2(\tau)}{3(1+\varepsilon_\lambda)(1+m)} [\text{Ki}(\tau) + \text{Ko}\dot{\beta}_3(\tau)], \quad (3)$$

$$\text{где } D = -\left[\text{Ko} + \frac{1+\varepsilon_c}{1+\varepsilon_\lambda} \frac{\text{Ki}(\tau_\phi^0) + \text{Ko}\dot{\beta}_3^0}{3(1+m)} \right].$$

В формулах (1)–(3) использованы обозначения:

$$\theta(\rho, \tau) = \frac{T(\rho, \tau) - T_0}{T_\phi - T_0}; \quad \text{Ki}(\tau) = \frac{q_n(\tau)h}{\lambda_0(T_\phi - T_0)}; \quad \rho = \frac{x}{h}; \quad \beta_j(\tau) = \frac{B_j(\tau)}{h};$$

$$\tau = \frac{a_0 t}{h^2}; \quad \text{Bi} = \frac{\alpha_k h}{\lambda_0}; \quad \text{Ko} = \frac{q_\phi}{c_p^0(T_\phi - T_0)},$$

$$\lambda(T) = \lambda_0 + \delta_\lambda(T - T_0) = \lambda_0(1 + \varepsilon_\lambda \theta); \quad \varepsilon_\lambda = \frac{\delta_\lambda}{\lambda_0}(T_\phi - T_0);$$

$$c(T) = c_0 + \delta_c(T - T_0) = c_0(1 + \varepsilon_c \theta); \quad \varepsilon_c = \frac{\delta_c}{c_0}(T_\phi - T_0).$$

Здесь T_0 , $T_\phi = T_{\text{ликв}}$; T_c – начальная температура металла, температуры плавления и перегрева расплава, К; q_ϕ – скрытая теплота плавления, кДж/кг; α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·К); $a_0 = \lambda_0/(c_p \gamma)$ – коэффициент температуропроводности, м²/ч; c_p – удельная теплоемкость, кДж/(кг·К); x – координата, м; $H = 2h$ – размер тела, м; t – время, ч; $B_j(\tau)$ – непрогретая ($j = 1$) или неоплавленная ($j = 3$) зона, м.

Принимая во внимание тот факт, что металлизированные окатыши имеют примерно одинаковую форму и размеры, примем за характерную форму шар, а характерный размер составит 2 см. Кажущаяся плотность металлизированных окатышей составляет порядка 5000 – 5500 кг/м³.

Результаты расчетов по формулам (1) – (3) приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Продолжительности различных периодов процесса «прогрев–нагрев–плавление» металлизированных окатышей

Период	Продолжительность, мин (%)
Время прогрева	0,018793 (0,612245 %)
Время нагрева	2,384946 (77,69648 %)
Время плавления	0,665828 (21,69127 %)
Суммарное время процесса	3,069568 (100 %)

Как видно из таблицы, продолжительность расплавления окатышей составляет около 3 минут.

После установления продолжительности расплавления отдельных окатышей определим их расход таким образом, чтобы скорость подачи была равна скорости плавления.

При попадании окатышей в жидкую сталь они нагреваются за счет отбора теплоты от жидкого металла. Энергия, полученная окатышами, будет равна

$$\Delta E = \int_0^{\tau_k} P_{\text{ок}} \cdot c_{\text{эфф.ок}} \cdot (t_{\text{кон.ст}} - t_{\text{нач.ок}}) \cdot d\tau, \quad (4)$$

где $P_{\text{ок}}$ – расход металлургических окатышей кг/с; $c_{\text{эфф.ок}}$ – эффективная теплоемкость металлургических окатышей с учетом теплоты фазового перехода; $t_{\text{кон.ст}}$, $t_{\text{нач.ок}}$ – соответственно температура стали и начальная температура окатышей, τ – время подвалки окатышей.

В дальнейшем будем считать расход окатышей постоянной величиной (независящим от времени), что позволит вынести его за знак интегрирования.

Чтобы предотвратить остывание расплава, необходимо подводить к нему энергию (за счет электроэнергии, теплоты экзотермических реакций и т.д.)

$$\eta(W + E_{\text{экз}}) \int_0^{\tau_k} d\tau = P_{\text{ок}} \cdot c_{\text{эфф.ок}} \times \\ \times (t_{\text{кон.ст}} - t_{\text{нач.ок}}) \cdot \int_0^{\tau_k} d\tau, \quad (5)$$

где η – коэффициент полезного действия; W – мощность подаваемой электроэнергии (мощность трансформатора); $E_{\text{экз}}$ – мощность экзотермических реакций.

Рассмотрим плавку металлургических окатышей на примере печи малой емкости (емкость ДСП 6 тонн). Технические характеристики печей малой емкости [4] приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные параметры ДСП малой емкости

Наименование параметра	ДСП-1,5	ДСП-3	ДСП-6	ДСП-12
Номинальная масса плавки, т	1,5	3	6	12
Мощность печного трансформатора, МВА	1,6	2,5	5	8 (+20%)
Расчетное время расплавления твердой завалки, мин	60	60	60	60
Диаметр графитированного электрода, мм	150	200	300	350
Тип выпуска	выпуск через сливной носок			
Напряжение высокой стороны трансформатора, кВ	6–10	6–10	35–40	35–40

Как правило, загрузка металлизированных окатышей происходит по непрерывным дозаторам через технологическое отверстие в своде печи (диаметром 300–600 мм). Попадая на зеркало жидкого металла, окатыши имеют «пятно» диаметром около 1 м. Так как кажущаяся плотность окатышей составляет порядка 5 – 5,5 т/м³, то они плавают на поверхности, погруженные в металл на 2/3 (при этом насыпная плотность окатышей равна 2 – 2,5 т/м³). По производственным данным считается, что глубина слоя окатышей на металле не превышает 25 см. Таким образом, масса одновременно находящихся окатышей в печи равна

$$M_{\text{ок}} = \frac{\pi d^2}{4} l \cdot \rho = \frac{3,14 \cdot 1^2}{4} \cdot 0,23 \cdot 2500 = 451 \text{ кг.}$$

Так как время плавления металлизированных окатышей составляет 3 минуты, то рекомендуемый расход окатышей 150,3 кг/мин (или 30 кг/(мин·МВт), или 0,5 кг/(сек·МВт)). Эти данные подтверждаются работой [5], согласно которой оптимальный расход металлизированных окатышей (соответственно и удельная скорость плавления) находится в пределах 28 – 32 кг/(мин·МВт).

Определим количество подводимой энергии (мощность трансформатора), необходимой для осуществления процесса расплавления металлизированных окатышей при их непрерывной загрузке исходя из формулы (5). В расчетах положим, что мощность тепловыделения от экзотермических реакций составляет 20 % от мощности подводимой трансформатором, а коэффициент полезного действия печи составляет 0,65, эффективная теплоемкость металлизированных окатышей равна 1060 Дж/(кг·К), температура расплава 1540 °С, начальная температура окатышей 0°С.

Необходимая подводимая мощность составляет

$$W = \frac{P_{\text{ок}} \cdot c_{\text{эфф_ок}} \cdot (t_{\text{кон_ст}} - t_{\text{нач_ок}})}{1,2 \cdot \eta} =$$
$$= \frac{0,5 \cdot 1060 \cdot 1540}{1,2 \cdot 0,65} = 1,046 \text{ МВА.}$$

Литература

1. Тимошпольский, В. И. Теоретические основы теплофизики и термомеханики в металлургии / В.И. Тимошпольский, Ю.С.Постольник, Д.Н. Андрианов. – Мн.: Бел. наука, 2005. – 560 с.
2. Постольник, Ю. С. Метод расчета процессов плавления кусковых материалов в жидкой ванне / Ю.С. Постольник, В.И. Тимошпольский, О.А. Кондрашова // Металлургическая теплотехника: история, современное состояние, будущее. К столетию со дня рождения М.А.Глинкова: Тр. III Междун. науч.-практ. конф. (1–3 февраля 2006 г. – МИСиС).– М.: МИСиС, 2006. – С. 580–583.
3. Тимошпольский, В. И. Методика расчета продолжительности расплавления кускового лома в расплаве жидкой стали / В.И. Тимошпольский, П.Э. Ратников // Мат-лы V междунар. науч.-техн. конф. «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, 2007). – Т. 1. – С. 235–241.
4. <http://www.sibelectrotherm.ru/Product/EAF/EAF.htm>.

5. Федина, В. В. Разработка энергосберегающего режима плавления металлизированных окатышей в дуговой сталеплавильной печи с целью повышения эффективности производства: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02. / В.В. Федина. – М., 2003.

УДК 559.041

И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук,
И.Н. ПЛЮЩЕВСКИЙ, канд.техн.наук,
П.Э РАТНИКОВ, канд.техн.наук,
Н. Г. МАЛЬКЕВИЧ, канд. техн. наук (БНТУ)

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА МЕТАЛЛА В ПРОХОДНЫХ ПЕЧАХ ПОД ОБРАБОТКУ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

В кузнечных цехах машиностроительных предприятий Республики Беларусь в настоящее время используются нагревательные печи проходного типа (толкательные печи) устаревшей конструкции. Модернизация парка нагревательных печей, помимо ввода нового оборудования, предполагает также реконструкцию действующих печей, которая в большинстве случаев подразумевает максимально возможное сохранение самой конструкции печи (чаще всего металлоконструкции). Учитывая, что нагревательная печь предназначена для обеспечения нагретыми заготовками какого-либо агрегата – пресса, прокатного стана, молота и др., основным ее показателем является производительность, которая должна согласовываться с производительностью конкретного агрегата. Вместе с тем интенсификация процессов теплообмена в нагревательной печи, и как следствие, повышение производительности, может привести к необходимости после нагрева заготовок выдерживать их в печи для поддержания ее температуры на уровне, необходимой для дальнейшего передела, что приведет к перерасходу топлива. Это требует разработки оптимальной технологии нагрева, обеспечивающей как топливосбережение, так и требуемые свойства заготовок для дальнейшей обработки. Основными статьями, влияющими на себестои-