



The mechanism of the lump metal scrap melting at loading it into liquid melt is investigated.

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, Президиум НАН Беларуси, С. В. КОРНЕЕВ, БНТУ

УДК 669.041

ПЛАВЛЕНИЕ КУСКОВОГО МАТЕРИАЛА В ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТОМ РАСПЛАВЕ В ПРОЦЕССЕ ВЫПЛАВКИ В ДСП

Введение. Как известно, одним из основных элементов технологии высшего уровня при выплавке стали в дуговых сталеплавильных печах является плавка с «жидким» стартом или работа с «болотом» [1, 2]. Основным отличием этой, уже широко распространенной, технологии является то, что металлы выпускают в ковш без шлака, а шлак и металл в количестве 10–15% остаются в дуговой печи для последующей плавки.

В связи с этим актуальным представляется исследование закономерностей плавления кускового металлического лома при загрузке его в жидкий расплав.

При погружении стального лома в железоуглеродистый расплав возможны различные особенности хода процесса плавления.

1. При концентрации углерода в расплаве большей, чем в шихтовых материалах, необходимо учитывать диффузионное растворение лома в расплаве даже при более низкой температуре расплава, чем температура плавления лома. Такая ситуация возможна, если в начале плавки использовался чугун и расплав насыщен углеродом и другими химическими элементами.

2. При малой концентрации углерода в расплаве и незначительном коэффициенте теплообмена и перегреве происходит намерзание расплава на поверхности. Такая ситуация типична для большинства сталеплавильных агрегатов, когда концентрация углерода и других элементов в расплаве меньше, чем в твердом металле шихты.

Рассмотрим плавление кускового материала на примере плавления неограниченной пластины, имеющей химический состав, близкий к составу расплава, а, следовательно, близкие температуры плавления кускового материала и затвердевания расплава. При больших значениях коэффициента теплоотдачи (более 1000 Вт/(м²·К)), при отношении толщины пластины к другим геометрическим размерам, равном 0,5 и менее, время полного

расплавления тела практически не будет отличаться от времени полного расплавления неограниченной пластины.

Методика расчета продолжительности плавления. Особенностью использования данной методики в сравнении с плавлением тела в газовой среде с удалением расплава является задание постоянной плотности потока через поверхность нагреваемого и плавящегося тела. Это допущение справедливо по той причине, что в начальный период на поверхности тела образуется затвердевший слой расплава и условия теплопередачи через поверхность изменяются таким образом, что тепловой поток можно принимать постоянным на протяжении всего времени нагрева и плавления (рис. 1).

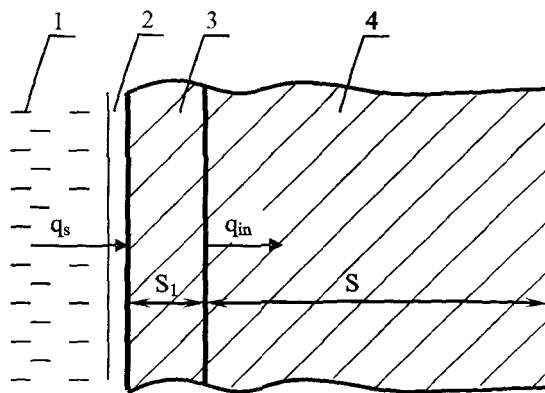


Рис. 1. Геометрическая схема задачи плавления: 1 – жидкий расплав; 2 – пограничный слой; 3 – затвердевшая корка; 4 – твердый металл

Уравнение баланса энергии на границе плавящегося тела имеет вид:

$$q_s + q_{cov} = q_{in} \quad (1)$$

где q_s – удельный тепловой поток на поверхность тела, Вт/м²; q_{cov} – удельный тепловой поток от внутреннего источника затвердевающей корки, Вт/м²; q_{in} – внутренний тепловой поток, Вт/м².

Удельный тепловой поток на поверхность тела можно принять постоянным:

$$q_s = \alpha(T_{bath} - T_{sol}), \quad (2)$$

где α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); T_{bath} — температура ванны расплава, °С; T_{sol} — температура начала плавления, °С. Далее под T_{sol} будем понимать среднюю температуру между температурой солидуса и ликвидуса.

Внутренний тепловой поток q_{in} определяется градиентом температур внутри твердого тела.

Удельный тепловой поток от внутреннего источника затвердевающей корки можно выразить формулой:

$$q_{cov} = \frac{S_1 \Lambda \rho}{\Delta \tau}, \quad (3)$$

где S_1 — толщина затвердевшего слоя, м; Λ — скрытая теплота плавления (затвердевания), Дж/кг; ρ — плотность затвердевшего металла, кг/м³; $\Delta \tau$ — время роста корки, с.

Рост корки прекратится, когда будут равны внутренний и внешний потоки.

Таким образом, при плавлении тела в жидком расплаве внешний тепловой поток является постоянным как во время нагрева поверхности до температуры начала плавления, так и непосредственно во время плавления, поэтому время полного расплавления можно найти по формуле:

$$\tau = \frac{[c_p(T_{sol} - \bar{T}(\tau_0)) + \Lambda] \rho R}{\alpha(T_{bath} - T_{sol})}, \quad (4)$$

где c_p — средняя удельная теплоемкость в интервале нагрева, Дж/(кг·К); $\bar{T}(\tau_0)$ — среднемассовая начальная температура, °С; R — половина толщины пластины, м.

Анализ результатов расчета времени плавления. С целью установления закономерностей плавления кускового материала выполнены расчеты времени плавления бесконечной пластины при следующих исходных данных: характерный размер — половина толщины пластины $R=0,01-0,2$ м; температура начала плавления $T_{sol}=1485$ °С; средняя плотность в интервале нагрева — для брикетов $\rho=4500-7000$ кг/м³,

для стального лома $\rho=7000-7800$ кг/м³, для чугуна $\rho=7000$ кг/м³; температура ванны расплава $T_{bath}=1580$ °С; коэффициент теплоотдачи $\alpha=1000-20000$ Вт/м²; скрытая теплота плавления $\Lambda=270$ кДж/кг; удельная средняя теплоемкость в интервале нагрева $c_p=590-880$ Дж/(кг·К). Результаты расчетов продолжительности плавления кускового лома от параметров внешнего и внутреннего теплообмена приведены на рис. 2–6.

Наиболее существенное влияние на скорость плавления оказывает коэффициент теплоотдачи, который может существенно изменяться в зависимости от условий процесса плавки. Интенсификации теплообмена способствует создание искусственной циркуляции металла при помощи продувки [2, 3]. Наибольшие коэффициенты теплообмена (более 20 кВт/(м²·К)) достигаются при кипении ванны расплава. Под кипением в данном

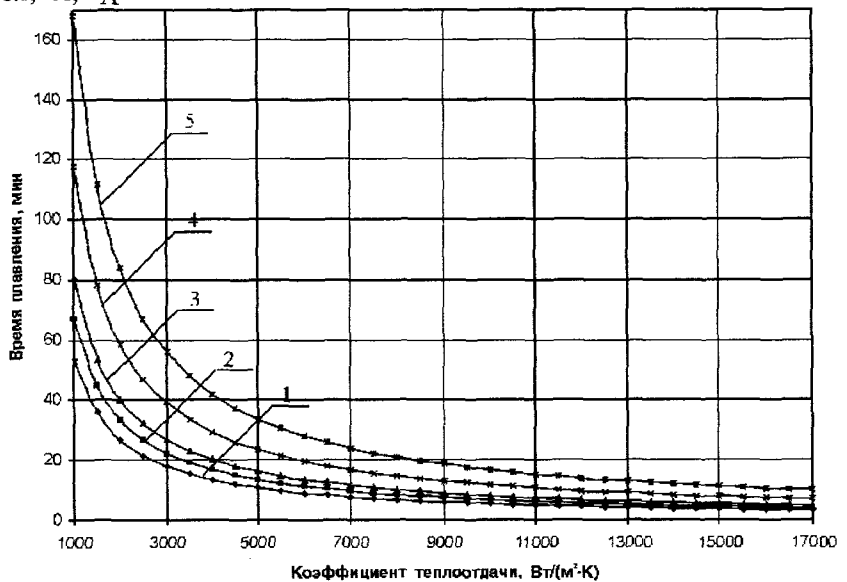


Рис. 2. Зависимость времени плавления от коэффициента теплоотдачи: 1 — $R=0,032$ м; 2 — 0,04; 3 — 0,048; 4 — 0,07; 5 — 0,1 м

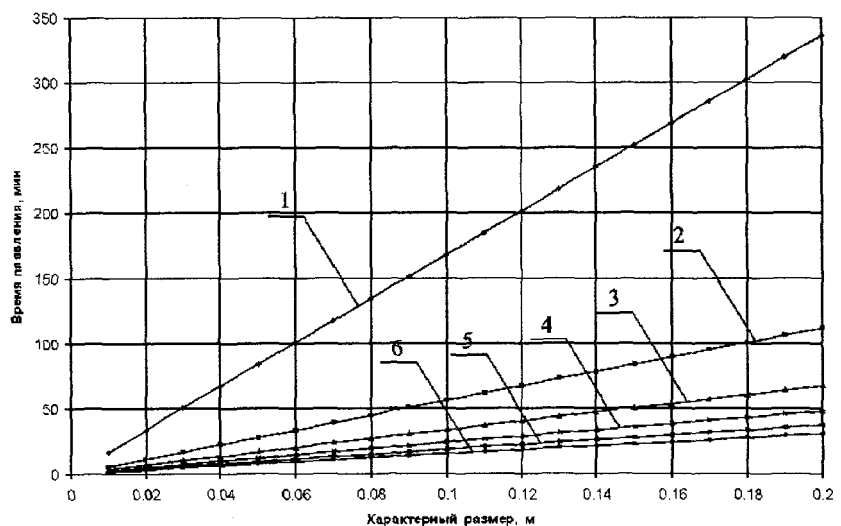


Рис. 3. Зависимость времени плавления от размера пластины: 1 — $\alpha=1000$ Вт/(м²·К); 2 — 3000; 3 — 5000; 4 — 7000; 5 — 9000; 6 — 11000 Вт/(м²·К)

случае понимается процесс активного перемешивания ванны расплава всплывающими пузырьками оксида углерода, образующимися при окислении углерода, растворенного в жидком металле.

На рис. 2 показана зависимость времени плавления пластины различных размеров от коэффициента теплоотдачи для материала со средней теплоемкостью в интервале нагрева, равной 687 Дж/(кг·К) (стали 08, 20 и др.). Из рисунка видно, что увеличение коэффициента теплообмена эффективно до определенного предела, а именно увеличение коэффициента теплоотдачи выше 15 кВт/(м²·К) не приводит к существенному сокращению времени плавления.

Зависимость времени плавления от размера пластины при постоянной начальной температуре ($t_0=20\text{ }^\circ\text{C}$) показана на рис. 3. Здесь очевидно, что наклон линии определяется коэффициентом теплоотдачи, причем коэффициент теплоотдачи в реальных условиях металлургических агрегатов, как правило, больше 3 кВт/(м²·К).

На рис. 4 показана зависимость времени плавления от коэффициента теплоотдачи при различной начальной температуре. Из рисунка видно, что предварительный подогрев металлического лома наиболее эффективен при малых значениях коэффициента теплоотдачи.

В связи с тем что в качестве металлошхты могут использоваться брикеты из металлической стружки плотностью от 4500 до 7000 кг/м³, выполнены расчеты зависимости времени плавления пластины от плотности материала (рис. 5). Из рисунка видно, что повышение плотности брикетов приводит к увеличению времени плавления, причем наибольшие отклонения от времени плавления лома наблюдаются при сравнительно небольших значениях коэффициента теплоотдачи.

Составляющие металлошхты, загружаемой в печь, имеют различные теплофизические свойства (брикеты, чугун, углеродистый и легированный лом и др.), а, следо-

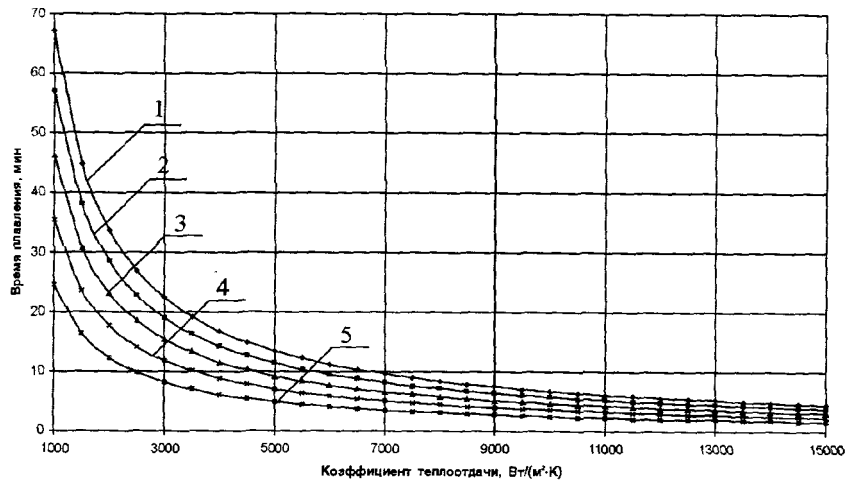


Рис. 4. Зависимость времени плавления от коэффициента теплоотдачи при различной начальной температуре и полутолщине пластины $R=0,04\text{ м}$: 1 - $T_0=20\text{ }^\circ\text{C}$; 2 - 300; 3 - 600; 4 - 900; 5 - 1200 $^\circ\text{C}$

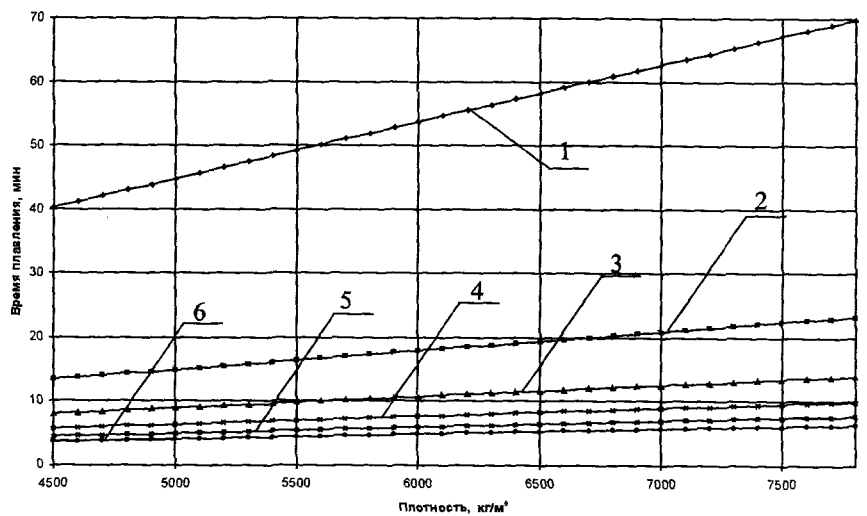


Рис. 5. Зависимость времени плавления от плотности материала при полутолщине пластины $R=0,04\text{ м}$ и средней теплоемкости материала, равной 687 Дж/(кг·К): 1 - $\alpha=1000\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$; 2 - 3000; 3 - 5000; 4 - 7000; 5 - 9000; 6 - 11000 Вт/(м²·К)

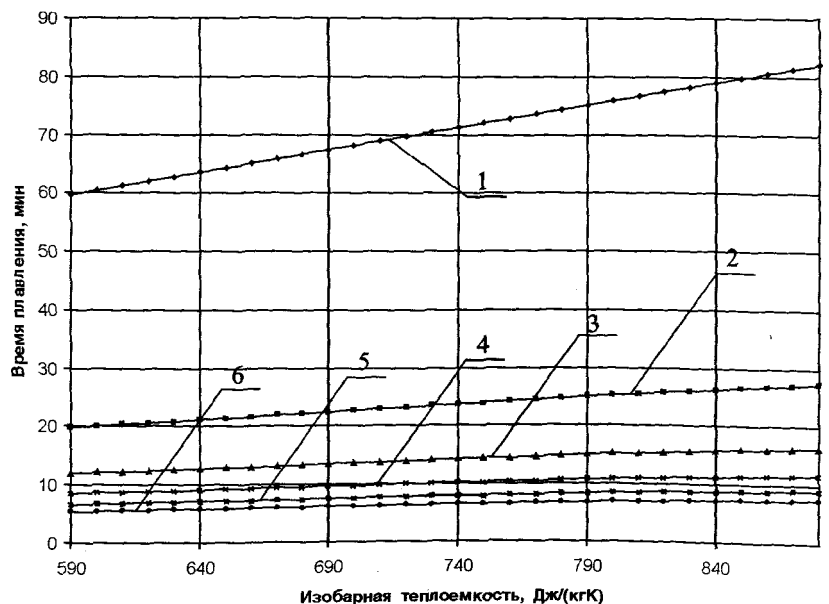


Рис. 6. Зависимость времени плавления от теплоемкости материала: 1 - $\alpha=1000\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$; 2 - 3000; 3 - 5000; 4 - 7000; 5 - 9000; 6 - 11000 Вт/(м²·К)

вательно, и различную теплоемкость, приводящую к изменению времени расплавления. Анализ времени плавления тела в зависимости от значения теплоемкости показал, что время плавления лома различного химического состава может различаться на 20–25% (рис. 6).

Полученные закономерности изменения продолжительности плавления кускового лома в зависимости от параметров внешнего и внутреннего теплообмена приведены на рис. 7, с помощью которого представляется возможным определить скорость плавления лома при различной начальной температуре загружаемого лома и его размеров и условий теплообмена в жидкой ванне.

В работе [4] приведены данные о технологических показателях опытных плавков для условий плавления скрапа в ванне конвертера и расчетных значениях коэффициента теплообмена. Для температуры расплава 1594 °С, содержании углерода в ванне, равном 0,28% и толщине куска, равной 0,13 м, была определена скорость плавления лома, которая составила 8,7 мм/мин, скорость движения расплава – 0,71 м/с. Коэффициент теплообмена при этом определяли двумя способами: из балансового уравнения (исходя из известной скорости плавления лома и температуры плавления, равной 1510 °С) и кри-

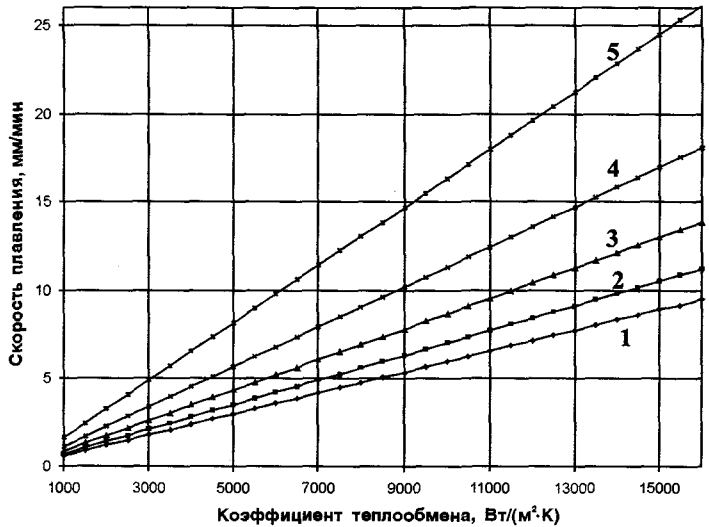


Рис. 7. Зависимость скорости плавления от коэффициента теплоотдачи при различной начальной температуре и полутолщине пластины $R = 0,04$ м: 1 – $T_0 = 20$ °С; 2 – 300; 3 – 600; 4 – 900; 5 – 1200 °С

териального уравнения. В первом случае коэффициент теплообмена составил 18,4 кВт/(м²·К), а во втором – 28,5 кВт/(м²·К).

Задавая исходные данные из работы [4] и учитывая энергию, необходимую на перегрев расплава над точкой плавления твердого металла, получаем скорость и время плавления скрапа (см. таблицу).

Скорость и время плавления скрапа при определении коэффициента теплоотдачи различными способами

| Параметр | Коэффициент теплоотдачи $\alpha_1 = 18,4$ кВт/(м²·К) | Коэффициент теплоотдачи $\alpha_2 = 28,5$ кВт/(м²·К) |
|----------------------------|--|--|
| Скорость плавления, мм/мин | 8,7 | 13,67 |
| Время плавления, мин | 14,9 | 9,5 |

Из таблицы видно, что разница в определении времени плавления при задании различных коэффициентов теплообмена составила 5,4 мин.

Если не учитывать перегрев расплава над температурой плавления, получим для $\alpha = 28,5$ кВт/(м²·К) скорость плавления 14,4 мм/мин, а время плавления пластины 9 мин, т.е. разница между временем плавления с учетом перегрева расплава и без учета перегрева составляет 0,5 мин или 5,3%.

Таким образом, при практических расчетах времени плавления основную сложность расчета составляет определение коэффициента теплоотдачи, который в общем случае изменяется по ходу процесса в зависимости от соотношения вводимой в ванну и потребляемой в процессе плавления энергии и изменения геометрических характеристик материала, располагающегося в ванне.

Выводы

В отличие от нагрева и оплавления металла в газовой среде плавление металла в расплаве с небольшим перегревом над температурой плавления

(затвердевания) имеет особенность, заключающуюся в том, что внешний тепловой поток практически на протяжении всего процесса нагрев–плавление является постоянным. Это значительно упрощает расчет времени полного расплавления тела в форме пластины.

Анализ результатов расчета времени расплавления показал, что существуют различные способы управления процессом расплавления кускового материала: увеличение температуры перегрева расплава над температурой плавления материала, уменьшение толщины кусков, предварительный нагрев лома, а также увеличение коэффициента теплоотдачи.

При этом установлено, что:

- увеличение температуры перегрева допустимо лишь до определенных пределов, так как при большом перегреве расплава резко снижается стойкость футеровки ванны, повышаются потери теплопроводностью, а также излучением с зеркала расплава, может нарушаться ход химических реакций в жидком металле. Оптимальным следует

считать перегрев над температурой плавления в 100 °С;

- уменьшение толщины кусков лома должно проводиться одновременно с мероприятиями по рациональной шихтовке завалочных корзин, так как от расположения материала в жидкой ванне зависит скорость циркуляции металла между твердыми кусками. Кроме выбора качественного лома, эти мероприятия требуют организации специальной подготовки шихты к плавке;

- наиболее оптимальными с точки зрения интенсификации процесса расплавления (сокращения времени плавки) представляются увеличение коэффициента теплоотдачи и предварительный подогрев лома. Повышение значения коэффициента теплоотдачи достигается за счет интенсификации перемешивания и циркуляции жидкого металла, однако увеличение коэффициента теплоотдачи является эффективным до определенной величины (15 кВт/(м²·К)). С другой стороны,

необходимо учитывать, что при близком расположении кускового материала друг к другу в расплаве предварительный подогрев лома, кроме указанного ранее эффекта, часто уменьшает вязкость расплава в пристеночной области, а следовательно, увеличивает коэффициент теплоотдачи.

Литература

1. Морозов А.Н. Современное производство стали в дуговых печах. Челябинск: Металлургия, 1987.
2. Тимошпольский В.И. Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. Мн.: Наука и техника, 1995.
3. Гольдфарб Э.М., Шерстов Б. И. Тепло- и массообмен при плавлении лома в кислородном конвертере // ИФЖ. 1970. Т. 18. С. 492–498.
4. Бакст В.Я., Харлашин П.С., Глинков Г.М., Романов И.О. О критериальных уравнениях тепло- и массопереноса при плавлении лома в жидком чугуне // Металлургическая теплотехника: история, современное состояние, будущее: Тр. III Междунар. науч.-практ. конф. (1–3 февраля 2006 г., МИСиС). М., 2006.