

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЛАВЛЕНИЯ ЧУШКОВОГО ЧУГУНА В БОЛЬШЕГРУЗНОЙ ВАГРАНКЕ

А.И.Туяхов, В.Л.Жук (ДонНТУ, г. Донецк), А.А. Мельник,  
А.И.Ярмоленко (ЗАО «МЛЗ», г. Макеевка), А.И.Касютин (ДонНТУ, г.  
Донецк)

*Приведены результаты исследования методом математического моделирования динамики плавления чушек чугуна в большегрузной вагранке. Проведенные расчеты по разработанной программе позволили определить оптимальные размеры чугунных чушек, обеспечивающие сокращение длительности их расплавления и повышение производительности вагранки*

На Макеевском литейном заводе (ЗАО «МЛЗ») изготавливают чугунные литые мелющие тела из износостойкого белого чугуна, применяемые при помоле различных материалов в горнорудной, цементной и угольной промышленности.

Для выплавки чугуна в большегрузной вагранке производительностью 14 т/ч в качестве металлических шихтовых материалов применяются литейные чушковые чугуны марок Л 1, Л 2, Л 6 (ДСТУ3132-95) и перепельные чушковые чугуны марок ПЛ 1, ПЛ 2 (ДСТУ 3132-95), стальной скрап, железо-стружечные брикеты и др. Доля чушкового чугуна (с массой трехзвенной чушки 36 кг) в металлошихте составляет 30-35 %.

Скорость плавления чугунной металлошихты определяется длительностью расплавления кусков шихты наибольшей массы, т.е. чушек чугуна. Металлошихта, загружаемая в вагранку совместно с флюсами и ферросплавами, постепенно нагревается движущимися навстречу отходящими газовыми средами, имеющими температуру на уровне завалочного окна около 400 °С. Максимальная температура газов (1650-1700 °С) наблюдается в зоне плавления в районе фурменного пояса. По данным [1] перепад между температурой газовой среды и металлошихты составляет примерно 80-100 °С до начала процесса расплавления.

Величина этого перепада температур будет зависеть от отношения поверхности к объему отдельных кусков металла, его теплопроводности и интенсивности передачи тепла от газов к шихте. Когда температура металла достигнет точки плавления, то некоторое время его опускание не будет сопровождаться повышением температуры поверхности до полного его расплавления.

При исследовании механизма плавления чушкового чугуна было установлено [2], что чушки в начальный момент расплавляются в их внут-

ренной части, содержащей легкоплавкие составляющие чугуна, в частности, фосфидную эвтектику, имеющую температуру плавления 950 °С. Затем жидкий металл вытекает, оставляя не расплавившуюся наружную оболочку, состоящую из более тугоплавких составляющих этой чушки. Образующиеся пустоты могут заполняться конгломератом из флюса, кокса, шлака, затрудняя дальнейший процесс плавления и увеличивая длительность плавки.

Описанный механизм плавления отдельной чушки чугуна подтверждается изображенной на рис. 1 фотографией чушки доменного чугуна, извлеченной из плавильной зоны с выплавленной внутренней частью. Чушка была извлечена при аварийной остановке вагранки Макеевского литейного завода (ЗАО «МЛЗ»), где видна не расплавившаяся оболочка, заполненная внутри шлакометаллическими включениями.



Рисунок 1 – Частично расплавленная чушка чугуна, извлечённая из плавильной зоны вагранки

Целью работы является определение оптимальных размеров чушкового чугуна в составе металлошихты для ваграночной плавки, обеспечивающих ускорение процесса плавления чушек и повышение производительности вагранки.

Экспериментальные исследования динамики плавления отдельного куска металлошихты на действующем агрегате представляют большие затруднения. Для исследования процесса нагрева и полного расплавления чушки чугуна была разработана математическая модель на основе решения дифференциального уравнения теплопроводности для нестационарного теплового состояния [3]. Расчеты выполнялись на ЭВМ по составленной программе.

Изменение температурного поля чугунной чушки по высоте вагранки (что то же самое, по времени) можно определить, решая дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$c \cdot \rho^* \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda^* \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda^* \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda^* \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \rho^* \cdot L_{кр} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \tau} \quad (1)$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности металла, Вт/м·К;  $c$  - теплоемкость металла, Дж/кг·К;  $\rho$  - плотность чугуна, кг/м<sup>3</sup>;  $L_{кр}$  - скрытая теплота кристаллизации, Дж/кг;  $\Psi$  - относительное количество твердой фазы в пределах двухфазной зоны.

Коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность металла вычисляются по следующим зависимостям:

$$\lambda = \lambda_{ТВ}(t) \cdot \psi + \lambda_{Ж} \cdot (1 - \psi) \quad (2)$$

$$c = c_{ТВ}(t) \cdot \psi + c_{Ж} \cdot (1 - \psi) - L_{кр} \frac{\partial \psi}{\partial \tau} \quad (3)$$

$$\rho = \rho_{ТВ}(t) \cdot \psi + \rho_{Ж} \cdot (1 - \psi) - L_{кр} \frac{\partial \psi}{\partial \tau} \quad (4)$$

где  $\lambda_{ТВ}$ ,  $c_{ТВ}$ ,  $\rho_{ТВ}$  - коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность твердого металла в зависимости от температуры;

$\lambda_{Ж}$ ,  $c_{Ж}$ ,  $\rho_{Ж}$  - коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность жидкого металла.

За начальные условия принимаем температуру чугуновой чушки в начальный момент времени, т.е. при  $\tau=0$   $t=f(x, y, z)$ . Граничные условия между заготовкой и средой запишутся в следующем виде:

$$\pm \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Bigg|_{\substack{x=0 \\ x=l_x}} = \alpha (t_{CP(\tau)} - t_{nx}) \Bigg|_{\substack{x=0 \\ x=l_x}} \quad (5)$$

$$\pm \lambda \frac{\partial t}{\partial y} \Bigg|_{\substack{y=0 \\ y=l_y}} = \alpha (t_{CP(\tau)} - t_{ny}) \Bigg|_{\substack{y=0 \\ y=l_y}} \quad (6)$$

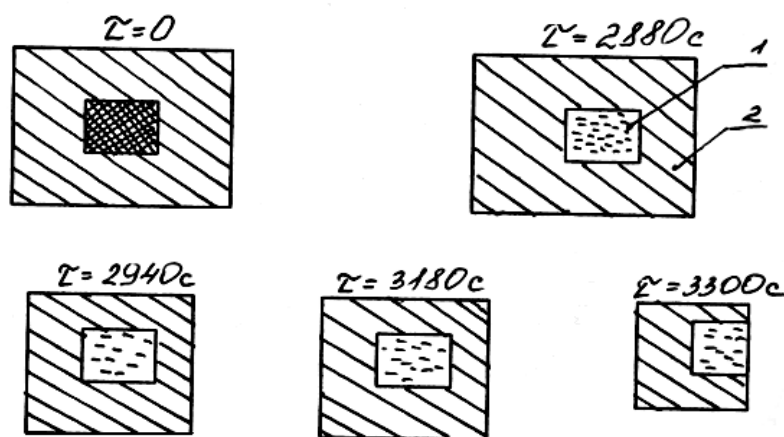
$$\pm \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \Bigg|_{\substack{z=0 \\ z=l_z}} = \alpha (t_{CP(\tau)} - t_{nz}) \Bigg|_{\substack{z=0 \\ z=l_z}} \quad (7)$$

Для упрощения принимаем, что чугуновая чушка имеет форму параллелепипеда. Поскольку чугуновые чушки имеют небольшой размер по сравнению с размерами вагранки, то считаем, что температура среды и коэффициент теплоотдачи по всем граням для данного момента времени одинаковые. Температура среды и коэффициент теплоотдачи меняются по высоте вагранки и полностью расплавиться чугуновая чушка должна за время  $\tau = 3600$  с (по практическим данным работы вагранки). При расчете нагрева и плавления чугунового тела учитывалось, что внутри твердого чу-

гуна содержатся легкоплавкие компоненты с определенными теплофизическими свойствами, принятыми по практическим данным. В процессе нагрева эти компоненты могут образовать жидкую фазу.

Рассматриваемая задача решается конечно-разностным методом по неявной схеме. Весь объем тела делится плоскостями на ряд сечений. Для основного тела процесс плавления наружных сечений осуществляется в интервале температур ликвидуса ( $t_{лик}$ ) и солидуса ( $t_{сол}$ ), которые определяются в зависимости от процентного содержания углерода в чугуна. После того, как температура сечения достигала температуры  $t_{лик}$ , считаем, что жидкая пленка стекает с внешней поверхности твердой части чугуна чушки и происходит скачкообразное уменьшение объема тела на величину, пропорциональную выбранному шагу по координате времени при соответствующих теплофизических параметрах чугуна (как твердого, так и жидкого) для данного интервала температур. После стекания (удаления) первого слоя рассчитывался прогрев и плавление следующего слоя чугуна чушки, но уже меньшего размера и так до тех пор, пока тело не расплавится до легкоплавкой сердцевинки.

На основе разработанной программы было выполнено моделирование динамики нагрева и плавления чугуна чушки с размерами  $0,4 \times 0,2 \times 0,2$  м и  $0,2 \times 0,15 \times 0,15$  м. В чушке с большими размерами появилась жидкая фаза в центре через время  $\tau = 2880$  с, а плавление с поверхности началось со времени  $\tau = 2940$  с. Через время  $\tau = 3360$  с тело полностью расплавилось (рис. 2). В чугуна чушке меньшего размера жидкая фаза в центре тела появилась через  $\tau = 1860$  с, а полностью расплавилась за  $\tau = 2760$  с.



1 – жидкая фаза; 2 – твёрдая фаза

Рисунок 2 – Динамика плавления чушкового чугуна в вагранке

Таким образом, оба чугуна тела полностью расплавились за время меньше 3600 с.

Проведенный теоретический анализ плавления чугуна чушек в большегрузной вагранке с использованием разработанной программы по-

казывает, что полное расплавление чугуна происходит на уровне в районе фурменных зон (расчет по времени движения шихтовых материалов). Легкоплавкая составляющая расположенная внутри объема чугунной чушки, полностью расплавляется на уровне 2,5 – 3,0 м выше фурменных зон.

Расчеты, проведенные по разработанной программе, показывают, что при замене чушкового чугуна крупного размера и массы в шихте ваграночной плавки на чугунные чушки и лом меньшего размера и массы, длительность расплавления твердой металлической части завалки можно сократить на 30-40 минут и повысить производительность вагранки.

Как показывают исследования [3] при использовании кусков чугунного лома более мелких размеров и массы, при одном и том же расходе кокса, температура жидкого чугуна будет более высокой по сравнению с большими размерами и массой. Например, при массе кусков металлошихты в пределах от 5 до 60 кг, разница в температуре выпускаемого чугуна может достигать 100 °С, кроме того, расход кокса снижается на 2-3 %. Однако, использование металлошихты с размерами менее 3-4 мм при обычном режиме ваграночной плавки нецелесообразно из-за увеличения потерь металла за счет окисления железа и потери металла со шлаком.

По данным публикаций, на такую технологию плавки чугуна в вагранках как малой, так и большой производительности переходят на зарубежных чугунолитейных заводах.

Технология частичной замены чушкового чугуна на чугунный лом с оптимальными размерами и массой предложена для внедрения на Макеевском литейном заводе. Для осуществления такого способа подготовки металлошихты к плавке можно использовать эксплуатирующуюся на Чимкентском заводе пресс-автоматов машину для разбивки чугунных чушек [4]. Машина может быть установлена на шихтовом дворе литейного цеха. Производительность машины составляет 5 т/ч.

#### Литература

1. Грачев В.А. Физико-химические основы плавки чугуна. Саратов: Издательство Саратовского университета, 1981.– 211 с.
2. Мельник А.А., Непочатов А.В., Ярмоленко А.И., Жук В.Л., Туяхов А.И. Повышение эффективности работы большегрузных вагранок путем замены части кокса на природный газ // Сборник трудов XII Международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12–17 сентября 2005 г.– Донецк: ДонНТУ, 2005. Т.2.– С. 242 – 245.
3. Фриментсдорф О., Витинг Т., Струнинг Н., Лемпере М. Совершенствование процесса плавки в вагранке // Литейное производство, 2005, № 6.– С. 21 – 24.
4. Кривошеев В.Н. Машина для разбивки чугунных чушек // Литейное производство, 1963, № 3.– С. 45 – 46.

© Туяхов А.И., Жук В.Л., Мельник А.А.,  
Ярмоленко А.И., Касютин А.И. 2007