

Е. В. Меняйло /к. т. н./

Национальная металлургическая академия
Украины

Исследование процесса перемещения расплава из прибыли для питания усадки отливки

Выведены расчетные формулы для определения продолжительности затвердевания (100 % твердой фазы) и времени достижения границы выливания осевой зоны бочки вальца, которая охлаждается в кокиле. Установлены особенности процесса перемещения расплава из прибыли для питания усадки отливок из чугуна с шаровидной формой графита и их объемная усадка. (Ил. 1. Библиогр.: 9 назв.).

Ключевые слова: отливка, прибыль, усадка, электрошлаковый обогрев, шаровидный графит, затвердевание, граница выливания

We derive formulas for calculating the duration of hardening (100% solids), and the time to reach the border pouring axial zone of the roll body, which is cooled in a metal mold. The features of the process of moving the melt from the profit for the shrinking supply of castings made of spheroidal graphite shape and their volume-tion shrinkage.

Key words: casting, profit, shrinkage, electroslag heating, spherical graphite, hardening, casting border.

Состояние вопроса и постановка проблемы

Согласно принятым положениям в теории литейных процессов [1; 2] продолжительность затвердевания прибыли должна быть равна или больше продолжительности затвердевания отливки, что обеспечит ее направленное затвердевание и отсутствие усадочных дефектов. Однако питание усадки из прибыли невозможно уже в «зоне микроскопических перемещений», если принять во внимание известную схему [1] формирования кристаллической структуры и продвижения фронта затвердевания от поверхности отливки к осевой зоне.

Это обусловлено тем, что часть жидкого металла остается в разобращенном состоянии между дендритными ветвями. Поэтому при затвердевании оставшейся части расплава образование усадочной пористости в отливке неизбежно, так что прибыль может не работать на этом этапе.

Уменьшить ширину этой зоны с усадочной пористостью возможно с помощью газодинамического воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл. Однако реализовать эту технологию пока возможно только на ограниченных типах отливок.

Установить точное значение температуры и время перехода сплава из зоны локальных перемещений в зону образования усадочной пористости не представляется возможным. Большинство исследователей процесс образования усадочных дефектов обуславливают количеством твердой фазы, которую определяют методом «рычага» по диаграмме состояния или моделированием. Так, в [3] значения твердой фазы для момента достижения «границы питания» осе-

вой зоны отливки составляет 85–90 % для Fe-C сплавов, а для алюминий-кремниевых сплавов принято 80–85 %. Однако в реальных многокомпонентных сплавах легирующие элементы так изменяют классические двухкомпонентные диаграммы состояния, что использовать правило «рычага» становится невозможным.

Все современные программы компьютерного моделирования (ProCast, AFSolid (SolidCast) – США; Полигон, LVMFow (NovaFlow) – Россия; Magma, Sitest (WinCast) – Германия; Simulor (Pamcast) – Франция; CastCAE – Финляндия и др.) позволяют имитировать процессы, происходящие при заполнении расплавом формы, кристаллизации многокомпонентного сплава, образовании усадочных дефектов, рассчитывать напряжения в отливке. Программы различаются функциональными возможностями и типом генерируемой сетки – способом разбиения геометрической модели на элементарные объемы. При одинаковом количестве расчетных узлов метод конечных элементов позволяет более точно выполнять расчеты по сравнению с методом конечных разностей, но имеет более сложную схему разбиения на элементарные объемы и большую продолжительность расчета. Точность результатов расчета во многом зависит от адаптации модели к реальным процессам затвердевания сплава, полученным чаще всего с помощью экспериментальных термографических исследований [4].

Однако ни одна из существующих программ компьютерного моделирования не позволяет установить «границу выливания», «границу питания», «зону макроскопических перемеще-

ний», «зону локальных перемещений» и «зону микроскопических перемещений». Поэтому актуальной задачей является проведение экспериментальных исследований процесса перемещения расплава из прибыли для питания усадки отливки.

Целью работы является установление технологических особенностей перемещения расплава из прибыли для питания усадки и разработка инженерной методики расчета продолжительности затвердевания бочки и шеек прокатных валков из чугуна с шаровидной формой графита.

Изложение основного материала исследований

Валки из чугуна составляют 90 % всех валков, работающих в клетях прокатных станов. Причем более половины из них приходится на чугун с шаровидной формой графита (высокопрочный чугун). По сравнению со стальными валками они обеспечивают высокую износостойкость рабочего слоя и удовлетворительную прочность сердцевины бочки и шеек. Отливают валки в стационарные литейные формы или центробежным способом, с гладкой бочкой или с литыми калибрами [5]. Центробежным способом отливают часть валков для листовых и трубoproкатных станов.

Производство валков осуществляют в основном в стационарных литейных формах. Сифонный способ заливки прокатных валков с тангенциальным подводом питателя к нижней шейке обеспечивает отгеснение неметаллических включений из рабочего слоя бочки, но ухудшает условия для направленного затвердевания отливки [5]. Неоднократные попытки заливать чугунные валки сверху через прибыль успеха не имели из-за повышенного брака по засорам рабочего слоя бочки корольками затвердевшего металла и частицами шлака.

Усадка сплавов при затвердевании обуславливает образование усадочных раковин и пор. Это особенно актуально для чугуна с отбеленной структурой рабочего слоя, плотность металла которого составляет $\sim 7660 \text{ кг/м}^3$ [6], что значительно выше плотности углеродистой стали $\sim 7500 \text{ кг/м}^3$ и серого чугуна $\sim 7200 \text{ кг/м}^3$ [2]. Поэтому усадка больше, а масса прибылей при литье чугунных прокатных валков достигает 40 % [5], что выше по сравнению с производством, например, стальных слитков. Для уменьшения непроизводительных потерь металла на прибыли в 90-х годах XX ст. под руководством В. Е. Хрычкова разработана технология комбинированного электродугового-электрошлакового обогрева (ЭДЭШО) прибылей чугунных прокатных валков, которая внедрена и успешно работает в

настоящее время на Днепропетровском (ДЗПВ) и Лутугинском (ЛЗПВ) заводах прокатных валков. Ее особенность заключается в том, что после окончания заливки валка в прибыль опускают графитированный электрод до соприкосновения с расплавом, затем приподнимают его для зажигания электрической дуги, которая горит под слоем порошкообразного флюса. После расплавления флюса и формирования шлаковой ванны происходит переход на электрошлаковый обогрев прибыли.

Технология электрошлакового обогрева (ЭШО), которая также применяется в вальцелитейных цехах, отличается тем, что легкоплавкий флюс вводят на струю заливаемого расплава в сифонную литниковую систему с тангенциальным подводом питателя в нижнюю шейку. За счет температуры перегрева чугуна флюс расплавляется и всплывает через нижнюю шейку, бочку и верхнюю шейку в прибыль, так что одновременно происходит рафинирование чугуна от неметаллических включений.

В вальцелитейных цехах продолжительность обогрева прибыли принята равной продолжительности затвердевания последнего элемента отливки – верхней шейки. В дальнейшем тепловые режимы и продолжительность обогрева оценивали также математическим моделированием [7]. В расчетах продолжительность обогрева также равнялась продолжительности затвердевания части отливки, расположенной ниже прибыли.

Экономическая эффективность ЭДЭШО и ЭШО возрастает с увеличением стоимости электроэнергии. Это обусловлено тем, что для питания усадки методом периодической доливки в прибыль перегретого металла необходимо иметь дополнительную печь, а ЭШО обеспечивает только поддержание жидкой металлической ванны в жидком состоянии при регулируемой температуре $\approx 1550 \text{ }^\circ\text{C}$. Экзотермические вставки и смеси оказались неэффективными для отливок массой более 1000 кг из-за высокой продолжительности затвердевания отливок по сравнению с продолжительностью работы экзотермических смесей [2; 7].

Таким образом, ЭДЭШО и ЭШО остаются наиболее технологичными и эффективными методами получения отливок без усадочных дефектов. Причем торец прибыли после обогрева имеет плоскую форму из-за подплавления настывшей металла, затвердевшего на стенках формы прибыли.

Наиболее эффективный этап питания усадки происходит в жидкой и жидко-твердой областях затвердевания [1]. С момента перехода сплава в твердо-жидкое состояние, что соот-

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

ветствует температуре выливания (t_b), питание усадки осуществляется только фильтрацией расплава через каркас дендритов в зоне локальных перемещений. В [8] установлено, что средняя скорость фильтрации расплава через двухфазную зону отливок из чугуна с шаровидной формой графита составляет 1,3–2,7 мм/мин. Поэтому если отключить электрообогрев с момента перехода сплава в твердо-жидкое состояние (граница выливания t_b), то, зная общую продолжительность затвердевания отливки, можно оценить глубину проникновения расплава из металлической ванны в отливку и уменьшить объем усадочных дефектов. Например, за 10 минут питание усадки за счет фильтрации составит всего 13...27 мм. Ориентироваться на этот процесс можно только при затвердевании массивных отливок, продолжительность затвердевания которых несколько часов.

Продолжительность процесса питания усадки из прибыли определяли в литейном цехе ПАО «Днепропетровский завод прокатных валков» на прокатных валках массой по 3600 кг, имеющих различное соотношение диаметров бочки, шеек и высоты (рис. 1а, 1б). Экспериментальные валки отливали из чугуна, модифицированного металлическим магнием в колоколе, который погружали в ковш после выпуска рас-

плава из индукционной печи. Окончательный химический состав валков составлял, масс. %:

- рис. 2а – С-2,99; Si-1,00; Mn-0,22; P-0,120; S-0,017; Cr-0,20; Ni-2,50; Mo-0,35; Mg-0,040;
- рис. 2б – С-2,96; Si-1,16; Mn-0,21; P-0,160; S-0,020; Cr-0,22; Ni-0,69; Mg-0,040.

Изменение уровня металла в прибыли определяли по перемещению электрододержателя установки ЭШО вслед за усадкой расплава с точностью $\pm 0,5$ мм, считая, что зеркало металла в прибыли плоское и без настывлей на ее стенках, как указано в [9]. Массу металла, который переместился из прибыли для компенсации усадки отливки за промежуток времени 10 мин, определяли перемножением величины перемещения электрододержателя на площадь прибыли и плотность жидкого чугуна ≈ 6900 кг/м³.

В проведенном эксперименте оценивали в основном продолжительность питания усадки из прибыли. Так, для первого валка, имеющего меньшую высоту, но больший диаметр (кривая а на рис. 1а), за первые 80 минут ЭШО расход металла из прибыли составил 95 кг или 76 % от всего объема металла, обеспечившего питание усадки валка.

В следующие 80 минут электрошлакового обогрева из прибыли в отливку переместилось 29,5 кг расплава или 24 % от всего объема метал-

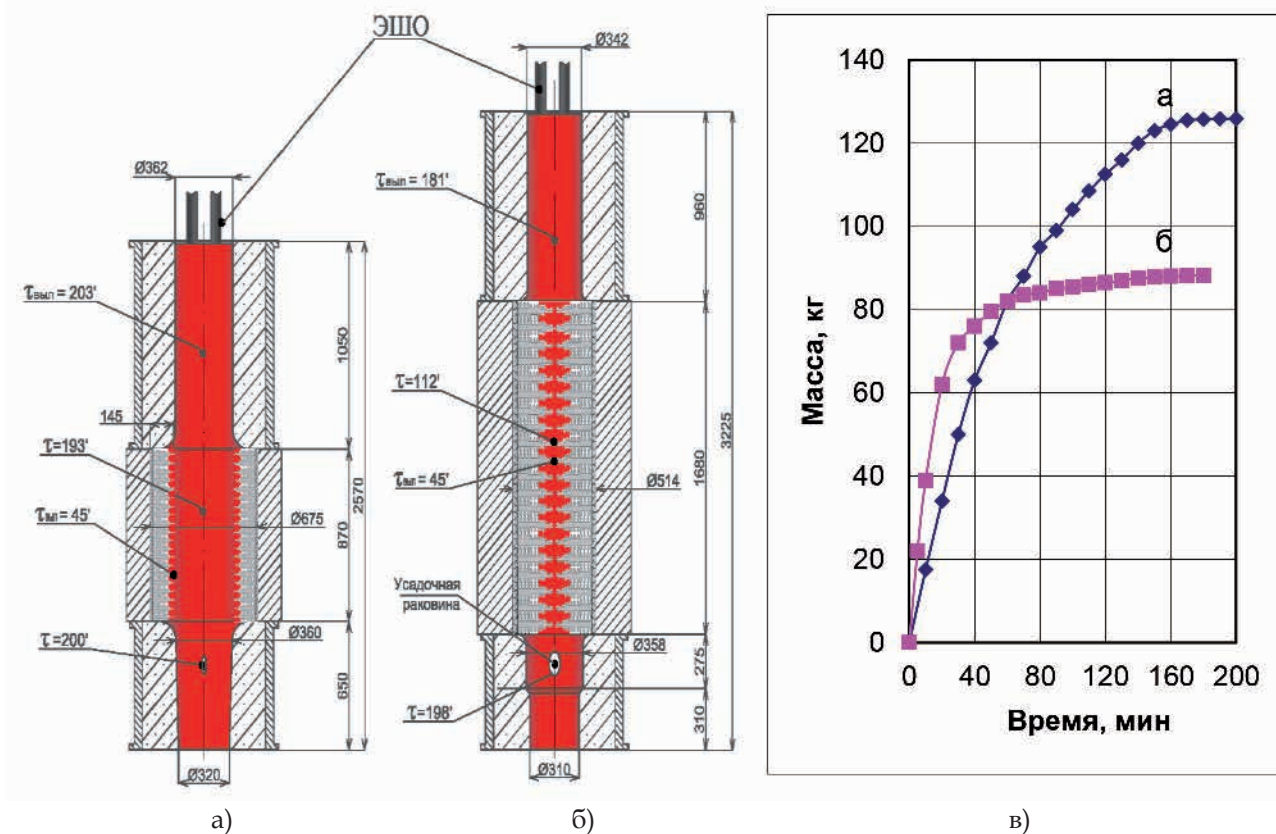


Рис. 1. Расход жидкого чугуна из прибыли (в) для компенсации усадки прокатных валков из высокопрочного чугуна массой по 3600 кг (а), (б)

ла. На 160-й минуте расход металла из прибыли достигает 124,5 кг и в дальнейшем прекращается. Небольшое перемещение электрододержателя вниз в интервале 160–180 мин обусловлено угаром компонентов шлаковой ванны.

Для валка той же массы 3600 кг, но большей высотой, кинетика усадки значительно отличается (кривая б на рис. 1б).

За 45 минут обогрева из прибыли в отливку переместилось 78 кг расплава или 89 % от всего объема металла. На 120–130-й минутах расход металла из прибыли достигает 88 кг и в дальнейшем прекращается.

Таким образом, объемная усадка первого валка (рис. 1а) составляет 3,5 %, а валка такой же массы 3600 кг, но большей высотой (рис. 1б) значительно меньше – 2,4 %. Причины возникновения такого расхождения рассмотрены ниже.

Для расчета процесса затвердевания отливок применили инженерную методику Б. Б. Гуляева, основанную на использовании критерия Фурье, в котором $a\tau/R^2$ заменено симплексом τ/R^2 . Б. Б. Гуляев, а затем и Н. И. Хворинов, показали, что величина температуропроводности (a) для одинаковых литейных материалов может быть введена в масштабе соответствующих диаграмм, в которых на оси ординат отложен относительный размер x/R . При использовании безразмерных координат можно сравнивать результаты опытов, проведенных на отливках различных размеров при условии постоянства материалов отливки, формы и геометрического подобия отливок [1; 2].

В соответствии с инженерной методикой расчета Б. Б. Гуляева нами обработаны экспериментальные кривые охлаждения, приведенные в [9], и построены кинетические кривые затвердевания цилиндрических отливок из чугуна с шаровидной формой графита, охлаждение которых проходило в песчано-глинистой форме и в чугуном кокиле.

Исходя из этих данных, для расчета времени достижения границы выливания осевой зоны бочки валка, которая охлаждается в кокиле, использовали формулу (1), а расчет общей продолжительности затвердевания (100 % твердой фазы) выполняли по формуле (2):

$$\tau_{Б-В} = 40900 \cdot R_{Б}^2 \quad (1)$$

$$\tau_{Ш-З} = 101700 \cdot R_{Б}^2 \quad (2)$$

Для расчета времени достижения границы выливания осевой зоны шейки валка, которая охлаждается в песчано-глинистой форме, применили формулу (3), а расчет общей продолжительности затвердевания выполняли по формуле (4):

$$\tau_{Ш-В} = 107000 \cdot R_{П}^2 \quad (3)$$

$$\tau_{Ш-З} = 371000 \cdot R_{П}^2 \quad (4)$$

Например, в бочке валка диаметром 675 мм (рис. 1а) переход сплава из жидко-твердого в твердо-жидкое состояние (граница выливания) произойдет на 78-й минуте:

$$\tau_{Б-В} = 40900 \text{ с/м}^2 \cdot (0,3375 \text{ м})^2 = 4659 \text{ с} \approx 78 \text{ мин.}$$

Этому моменту времени соответствует перемещение из прибыли 3/4 объема металла, обеспечившего компенсацию усадки отливки. Полученный результат обусловлен ускоренным затвердеванием бочки валка в чугунном кокиле и формированием отбеленной структуры рабочего слоя, плотность металла которого больше, чем у углеродистой стали (7500 кг/м^3), и согласно [8], составляет $\sim 7660 \text{ кг/м}^3$.

Для верхней шейки валка диаметром 362 мм (рис. 2а) время перехода сплава из жидко-твердого в твердо-жидкое состояние составляет:

$$\begin{aligned} \tau_{Ш-В} &= 107 \cdot 10^3 \cdot R^2 = 107 \cdot 10^3 \text{ с/м}^2 \cdot (0,181 \text{ м})^2 = \\ &= 3505 \text{ с} \approx 58 \text{ мин.} \end{aligned}$$

Сравнение общей объемной усадки валков массой 3600 кг показывает (рис. 1), что у первого она составляет 3,5 % (124,5 кг), а у второго – 2,4 % (88,0 кг). Такое существенное различие значений объемной усадки при одинаковой массе невозможно объяснить только повышенным содержанием никеля и молибдена в первом валке, так как различная кинетика перемещения расплава из прибыли и неодинаковое время прекращения усадки обусловлены в основном особенностями процесса затвердевания этих валков.

Так, для второго валка (рис. 1б) время достижения границы выливания осевой зоны бочки диаметром 514 мм равно:

$$\begin{aligned} \tau_{Б-В} &= 40900 \cdot R^2 = 4900 \text{ с/м}^2 \cdot (0,257 \text{ м})^2 = \\ &= 2701 \text{ с} \approx 45 \text{ мин.} \end{aligned} \quad (5)$$

Этому моменту времени соответствует перемещение 77,8 кг расплава из прибыли, что составляет 89 % всего объема металла, переместившегося для компенсации усадки второго валка (кривая б на рис. 1в), что значительно больше по сравнению с первым валком за тот же промежуток времени.

Более интенсивное перемещение расплава для компенсации усадки во втором валке обусловлено тем, что объем затвердевшего металла в бочке больше по сравнению с первым. Это подтверждает приведенный ниже расчет.

За 45 минут в бочке первого валка толщина слоя металла, перешедшего из жидко-твердого в твердо-жидкое состояние, составляет:

$$\tau/R^2 = (45 \text{ мин} \cdot 60 \text{ с}) : (0,3375 \text{ м})^2 = 23704 \text{ с/м}^2.$$

В соответствии с построенными кинетическими кривыми затвердевания цилиндрических отливок положению границы выливания $\tau_{\text{ввл}}$ рассчитанное значение $\tau/R^2 = 23704 \text{ с/м}^2$ соответствует относительной толщине затвердевшего металла $X/R = 0,43$ или $X = 0,43 \cdot 0,3375 = 0,145 \text{ м} = 145 \text{ мм}$. Тогда объем этого кольца металла, затвердевшего в бочке, высотой 0,870 м для первого валка составит 0,2099 м³. Во втором валке за 45 минут объем металла в бочке высотой 1,689 м равен 0,3484 м³ или в 1,66 раза больше по сравнению с первым валком. Поэтому из-за большего объема затвердевшего металла усадка из прибыли в начальные 45 мин больше во втором валке.

Однако затем питание усадки второго валка резко уменьшается по сравнению с первым. Причиной этого является ускоренное затвердевание бочки и нарушение питания усадки нижней шейки из прибыли. Так, расчеты показали, что общая продолжительность затвердевания бочки диаметром 514 мм составляет (формула 2):

$$\tau_{\text{б-з}} = 101700 \cdot R_{\text{б}}^2 = 101700 \text{ с/м}^2 \cdot (0,257 \text{ м})^2 = 6717 \text{ с} = 112 \text{ мин.}$$

Нижняя шейка диаметром 358 мм затвердевает (формула 4) через:

$$\tau_{\text{нш-з}} = 371000 \cdot R^2 = 371000 \text{ с/м}^2 \cdot (0,179 \text{ м})^2 = 11887 \text{ с} \approx 198 \text{ мин.}$$

Таким образом, отсутствие питания усадки из прибыли течение 86 минут приведет к образованию усадочных дефектов в нижней шейке второго валка, а массы металла в прибыли, необходимого для компенсации усадки, потребуется меньше по сравнению с первым валком (рис. 1).

Для первого валка (рис. 1а) продолжительность затвердевания бочки диаметром 675 мм равна (формула 2):

$$\tau_{\text{б-з}} = 101700 \cdot R^2 = 101700 \text{ с/м}^2 \cdot (0,3375 \text{ м})^2 = 11584 \text{ с} \approx 193 \text{ мин}, \quad (6)$$

а продолжительность затвердевания нижней шейки диаметром 360 мм (формула 4):

$$\tau_{\text{нш-з}} = 371000 \cdot R^2 = 371000 \text{ с/м}^2 \cdot (0,180 \text{ м})^2 = 12020 \text{ с} \approx 200 \text{ мин.} \quad (7)$$

Продолжительность затвердевания бочки первого валка – 193 мин соизмерима с затвердеванием нижней шейки в течение 200 мин, что указывает на формирование в ней минимального количества усадочной пористости.

Таким образом, несмотря на одинаковую массу валков, во втором валке питание усадки

заканчивается значительно раньше из-за ускоренного затвердевания бочки, которая нарушает поступление металла из прибыли в нижнюю шейку. Поэтому в нижней шейке валка, приведенного на рис. 1б, неизбежно образование усадочных дефектов, которые ослабляют прочность валка.

Выводы

1. Исследование кинетики расхода жидкого чугуна из прибыли для компенсации усадки при затвердевании валков из чугуна с шаровидной формой графита показали, что при одинаковой массе валков по 3600 кг, но с различными размерами бочки и шеек, объемная усадка значительно отличается – 3,5 % и 2,4 %.

2. Установлено, что уменьшение усадки одного из валков обусловлено ускоренным затвердеванием его бочки по сравнению с медленно затвердевающей нижней шейкой, диаметр которой больше, чем у первого валка. Поэтому из прибыли питание усадки нижней шейки прекращается раньше, до ее полного затвердевания, и в ней формируются усадочные дефекты в осевой зоне.

3. Выведены расчетные формулы для определения продолжительности затвердевания (100 % твердой фазы) и времени достижения границы выливания осевой зоны бочки валка, которая охлаждается в кокиле.

Библиографический список

1. Гуляев Б. Б. Теория литейных процессов: учеб. пособие / Б. Б. Гуляев. – Л.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
2. Лейбензон В. О. Тверднення металів і металевих композицій. Підручник для ВУЗів / В. О. Лейбензон, В. Л. Пілюшенко, В. М. Кондратенко [та ін.]. – Київ: Наукова думка. – 2009. – 447 с.
3. Селівьорстов В. Ю., Селівьорстов В. Ю. Хрычыков В. Е, Куцова В. З., Меняйло О. В. Патент на винахід «Пристрій для одержання виливків». UA, № 91943, заявка а2009 06145, подана 15.06.2009, зареєстрована 10.09.2010. Публікація 10.09.2010, Бюл. № 17.
4. Вейник А. И. Механизм образования усадочных дефектов в отливке / А. И. Вейник // Проблемы теплообмена при литье. – Минск: БПИ, 1960. – С. 88–110.
5. Кривошеев А. Е. Литые валки / А. Е. Кривошеев. – М.: Металлургиздат, 1957. – 360 с.
6. Хрычыков В. Е. Зональная ликвация в крупных чугунных отливках / В. Е. Хрычыков, Н. П. Котешов, В. М. Снаговский, А. Е. Кривошеев // Литейное производство. – 1983. – № 6. – С. 26–28.

7. Хрычиков В. Е. Термокинетические условия образования усадочных дефектов в чугунах прокатных валках / В. Е. Хрычиков // Процессы литья. – 1996. – № 1. – С. 24–31.

8. Хрычиков В. Е. Влияние комбинированной кокильно-песчаной литейной формы на затвердевание и формирование макроструктуры в крупных отливках из высокопрочного чугуна / В. Е. Хрычиков, Н. П. Котешов // Литейное производство. – 1994. – № 12. – С. 12.

9. Хрычиков В. Е. Комбинированный электродуговой-электрошлаковый обогрев прибылей чугунных прокатных валков / В. Е. Хрычиков, Н. А. Будагьянц, В. П. Камкин [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2001. – № 2. – С. 38–43.

Поступила 03.11.2015



УДК 621.771.07

Наука

В. Е. Хрычиков /д. т. н./, В. Т. Калинин /д. т. н./,
Н. В. Сусло /к. т. н./, В. А. Кривошеев /к. т. н./,
Е. В. Меняйло /к. т. н./

Национальная металлургическая академия
Украины

Повышение эксплуатационной стойкости мелющих шаров при модифицировании исходного расплава чугуна брикетированными наномодификаторами

Проведено исследование влияния обработки чугуна нанодисперсными тугоплавкими соединениями на качество литых шаров и обоснован их выбор для обработки чугунных расплавов. Оптимальным количеством модифицирующей присадки является 0,030...0,035 % TiCN. Разработана и прошла опытно-промышленную проверку технология ввода наноматериалов в чугун в виде брикетов. Испытания промышленной партии шаров показали повышение их эксплуатационной стойкости с 22 до 27 % и уменьшение их расхода с 0,5...0,8 % до 0,13...0,3 % от массы перерабатываемой руды. (Ил. 2. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.).

Ключевые слова: чугун, мелющие шары, кокиль, нанодисперсный модификатор, брикеты, твердость, ударная стойкость, эксплуатационная стойкость.

Research of cast iron processing influence by nanodisperse high-melting compounds on quality of cast spheres is conducted and their choice for processing of cast iron smelts is proved. Optimum quantity of modifying additive compound is 0,030...0,035 % of TiCN. The technology of introduction of nanomaterials in cast iron in the form of briquettes is developed and underwent trial testing. Tests of industrial batch of spheres showed increase of their operational firmness from 22 up to 27 % and reduction of their expense from 0,5...0,8 % to 0,13...0,3 % of mass of the recycled ore.

Key words: cast iron, grinding spheres, chill mold, a nanodisperse modifier, briquettes, hardness, shock firmness, operational firmness

Состояние вопроса и постановка проблемы

Чугунные мелющие шары используют в бабанных мельницах для измельчения руды, клинкера, угля и других материалов. Качество шаров определяет эффективность помола материала [1–3].

В Украине основным способом производства шаров является литье в кокиль на шаролитей-

ных машинах [4–6]; на ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» шары Ø 60 мм – на конвейерно-кокильной установке типа ККУ-1 [7].

Чугунные мелющие шары, обладая достаточной твердостью, имеют пониженную ударную прочность по сравнению со стальными шарами. Однако стальные шары относительно дорогие и обладают неравномерной по объему твердостью