

А. А. Мочалов, Н. А. Шаповал, К. Д. Евфимко

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНОГО СЛИТКА

Разработан способ получения непрерывного слитка, который улучшает его качество за счет объемной однородности путем ввода частиц твердого металла с температурой ниже точки Кюри для данного сплава и создания вдоль оси кристаллизатора градиента магнитного поля.

Розроблено спосіб отримання неперервного злитку, який покращує його якість за рахунок об'ємної однорідності шляхом внесення частинок твердого металлу з температурою нижче точки Кюрі для даного сплаву та створення вздовж вісі кристалізатору градієнта магнітного поля.

The way of obtaining of the continuous bar that makes the quality of the bar better by its voluminous similarity with the help of bringing in it the particles of solid metal that has the temperature lower than the point of Kurey for this alloy and by creating of the gradient accelerator along the axle of the crystallizer was developed.

Ключевые слова: интенсификация процесса, непрерывный слиток, объемная однородность, кристаллизатор, градиент магнитного поля, теплота фазового перехода, микрохолодильник, изотерма, точка Кюри.

В настоящее время процесс получения непрерывного слитка больших размеров традиционным способом исчерпал свои возможности. Увеличение размеров слитка приводит к увеличению скорости разливки стали, глубины жидкой лунки и, как следствие, габаритов установки непрерывного литья заготовок.

Известные способы непрерывной разливки стали и получения непрерывного слитка, включающие в себя заполнение жидким металлом охлаждаемого кристаллизатора, вытягивание слитка из кристаллизатора и охлаждение его в зоне вторичного охлаждения [1], имеют недостатки. К ним можно отнести низкое качество, неоднородность центральной части слитка, большие габариты, малую производительность установок.

Известен способ получения непрерывного слитка [2], согласно которому в охлаждаемый кристаллизатор заливают жидкий металл, туда же вводят стальные листы, вытягивают слиток из кристаллизатора и охлаждают до полной кристаллизации во вторичной зоне.

Недостатками данного способа являются громоздкость, большие габариты установки, малая производительность, невозможность организовать объемную кристаллизацию, что ведет к неоднородности и ухудшению качества слитка и снижению производительности.

Целью работы являются улучшение качества слитка за счет его объемной однородности, а также разработка и определение технологических параметров интенсификации процесса кристаллизации непрерывного слитка. Цель достигается тем, что в жидкий металл, находящийся в кристаллизаторе, вводят частички твердого металла (микрохолодильники) с температурой ниже точки Кюри для данного сплава и создают вдоль оси кристаллизатора градиент магнитного поля. В результате этого на твердые частички металла со стороны неоднородного магнитного поля будет действовать сила, которая сообщит им ускорение на несколько порядков больше ускорения свободного падения, а следовательно, уменьшит время пребывания частиц в расплаве, их прогрев и вероятность полного расплавления и создаст предпосылки для объемной кристаллизации слитка.

Для интенсификации процесса кристаллизации непрерывного слитка в кристаллизатор, вдоль которого создают неоднородное магнитное поле, заливают жидкий металл со скоростью $0,48 \pm 0,40$ от массы металла формирующегося слитка, туда же вводят частички

твердого металла в количестве $0,52 \pm 0,60$ от общего расхода металла с температурой ниже точки Кюри для данного сплава.

На частицы со стороны неоднородного магнитного поля будет действовать сила [3]

$$F = P_m m dB / dz = ma, \quad (1)$$

где P_m – магнитный момент единицы массы, $A \cdot m^2/kg$; F – сила, действующая на частицу со стороны поля, Н; m – масса частицы, кг; a – ускорение частицы, m/c^2 ; dB/dz – градиент магнитного поля, Тл/м;

Согласно работе [3], на 1 г железа, внесенного в неоднородное магнитное поле с градиентом $dB/dz = 17$ Тл/м, будет действовать сила $F_1 = 4$ Н, тогда ускорение, с которым будет двигаться частица массой $m_1 = 1$ г, будет

$$a = \frac{F_1}{m_1} = \frac{4}{10^{-3}} = 4 \cdot 10^3 \text{ м} / \text{с}^2. \quad (2)$$

В выражении (1) сила пропорциональна массе частицы и величине $P_m dB/dz$, согласно вышесказанному, определим магнитный момент единицы массы, используя выражения (1) и (2)

$$P_m = \frac{a_1}{dB / dz} = \frac{4 \cdot 10^3}{17} = 2,38 \cdot 10^2 \text{ А} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}.$$

Наибольшее время пребывания частицы в расплаве кристаллизатора определяется из условия равенства нулю начальной скорости частицы и уравнений кинематики [4]

$$t_1 = \sqrt{\frac{2l}{a}} = \sqrt{\frac{2l}{P_m dB / dz}}, \quad (3)$$

где l – высота уровня жидкого металла в кристаллизаторе, м.

На введенные холодные частицы будет намораживаться тонкая корочка металла [5], толщина которой зависит от температуры частицы и времени пребывания ее в расплаве, поэтому время пребывания частицы в расплаве не должно превышать времени, которое необходимо для продвижения изотермы $T_{кр}$ в глубь частицы. Время, за которое частица прогревается до температуры $T_{кр}$ вглубь на величину $\delta = nR$, согласно [5-8], будет

$$t_2 = \frac{\delta^2}{k (\text{const})^2} = \frac{n^2 R^2}{k (2,68)^2}, \quad (4)$$

где δ – глубина проникновения, м; R – радиус частицы, м; k – коэффициент температуропроводности, m^2/c ; n – относительный коэффициент продвижения изотерм (0-0,7).

Соотношение между технологическими параметрами, обеспечивающими объемную кристаллизацию непрерывного слитка, получим с помощью выражений (3) и (4)

$$\frac{n^2 R^2}{k (2,68)^2} \geq \sqrt{\frac{2l}{P_m dB / dz}}. \quad (5)$$

С другой стороны, жидкий металл, заполняющий промежутки между твердыми сферическими частицами, должен отдать свою теплоту фазового перехода для нагрева центральной части твердых частиц (микрочолодильников) до температуры кристаллизации $T_{кр}$.

Тогда уравнение теплового баланса с учетом коэффициента компактности (0,52-0,6) [5] запишется так

$$\frac{4}{3} \pi R^3 (1 - \beta) r \rho = \frac{4}{3} \pi (R - \delta)^3 \rho c_v \Delta T_{cp}, \quad (6)$$

где r – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг; ρ – плотность металла, кг/м³; c_v – удельная теплоемкость затвердевшего металла, Дж/кг; ΔT_{cp} – среднеобъемный перепад температур между жидким и затвердевшим металлом, К; $\delta = nR$ – глубина проникновения изотермы $T_{кр}$, м; R – радиус частицы, м; $\beta = (0,52-0,6)$ – коэффициент компактности.

Из выражения (6) определим n

$$n = 1 - 3 \sqrt[3]{\frac{r(1 - \beta)}{c_v \Delta T_{cp}}}. \quad (7)$$

Зная, что $\delta = nR$, и используя выражения (5) и (7), найдем величину

$$\frac{dB}{dz} = \frac{lk^2 (2,68)^4}{P_m \delta^4} = \frac{52lk^2}{P_m n^4 R^4}. \quad (8)$$

Выражения (7) и (8) дают возможность найти оптимальные отношения между технологическими параметрами, обеспечивающими максимальную скорость вытягивания слитка.

Результаты расчета для стали ($r = 2,7 \cdot 10^5$ Дж/кг, $c_v = 700$ Дж/(кг · К), $T_{кр} = 1773$ К, $T_0 = 293$ К, $P_m = 2,38 \cdot 10^2$ А · м²/кг, $k = 6 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\beta = 0,52$) приведены в таблице.

Результаты расчета для стали

$R, \text{ м}$	$l = 0,1 \text{ м}$	$l = 0,5 \text{ м}$	$l = 1 \text{ м}$
	$dB/dz, \text{ Тл/м}$		
$0,3 \cdot 10^{-3}$	1360	6800	13600
$0,5 \cdot 10^{-3}$	176	880	1760
$1,0 \cdot 10^{-3}$	11	55	110
$1,5 \cdot 10^{-3}$	2,16	10,8	21,6
$2,0 \cdot 10^{-3}$	0,69	3,45	6,9

Максимальное значение dB/dz выбирается из конструктивных соображений, при этом необходимо учитывать, что для создания большего градиента dB/dz резко возрастают энергозатраты.

Минимальное значение $dB/dz = 0,7$ Тл/м выбирается из условия обеспечения однородности центральной части слитка, однако уменьшение градиента увеличивает неоднородность слитка из-за необходимости использования более крупных частиц.

Максимально возможную скорость вытягивания слитка для $dB/dz = 30$ Тл/м, $l = 0,1$ м, $P_m = 2,39 \cdot 10^2$ А · м²/кг вычисляют следующим образом:

$$w = \sqrt{2lP_m dB/dz}; \quad w = 37,8 \text{ м/с}.$$

Если сравнить данную скорость вытягивания слитка с существующими на современных установках непрерывной разливки стали, которые имеют порядок $w = (0,00-0,03)$ м/с, то производительность установки при данном способе разливки возрастает в 1000 раз, кроме того, возрастают однородность слитка и его качество.

Глубина жидкой лунки в этом случае будет значительно меньше (в 10-20 раз) и нет необходимости применять зону вторичного охлаждения, что позволяет уменьшить габариты установки.



Список литературы

1. Сладкошителей В. Т., Потанин Р. В., Рутес В. С. Непрерывная разливка стали на радиальных установках. – М.: Металлургия, 1974.

2. А. с. 933196 СССР, МКИ³ В22Д 11/00. Способ непрерывной разливки металла / А. С. Корниенко, Н. В. Леушин, О. В. Носоченко и др. - Опубл. 07.06.83, Бюл. № 12.
3. Мочалов О. О. Курс фізики: Навчальний посібник для вузів. — Миколаїв: НУК, 2008. — Т. 2. — 384 с.
4. Коваль С. С., Коваль С. В., Кучер Д. Ю. Моделирование процессов распределения инакулаторов в объеме слитка при непрерывной разливке: Тез. докл. // VI Міжнародна наукова школа-семінар по імпульсним процесам, в механіці суцільних середовищ. — Миколаїв, 2005. — С. 123-126.
5. Мочалов А. А., Шаповал Н. А. Математическая модель намораживания металла на микрохолодильник // Математичне моделювання. — 2009. - № 3. — С. 78-80.
6. Мочалов А. А., Гайша А. А., Шаповал Н. А. Математическая модель физических процессов кристаллизации слитков и сварных швов при наличии микрохолодильников // УГМТУ. — 2008. — № 6 (423). — С. 76-80.
7. Парселл П. Э. Берклеевский курс физики. Электричество и магнетизм. - М.: Наука, 1975. — С. 349-362.
8. Проблемы теплообмена: Пер. с англ. / Под ред. П. Л. Кириллова. — М.: Атомиздат, 1967. - 336 с.

Поступила 12.09.2009

УДК 621.746.516

В. А. Середенко, Е. В. Середенко

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ ШАРОВ В ЖИДКУЮ СРЕДУ

Методом физического моделирования на основе термогидродинамических критериев подобия и безразмерных соотношений изучен процесс литья шарообразных тел в охлаждающую несмешивающуюся жидкость. Проанализировано влияние ряда параметров, зависящих от температуры, на характер внедрения расплавленного объема в жидкую среду и его перемещения в ней, формообразование и сфероидизацию отливаемого тела. Определены рациональные условия проведения процесса литья, обеспечивающие его эффективность.

Методом фізичного моделювання на основі термогідродинамічних критеріїв та безрозмірних співвідношень вивчений процес лиття кулеподібних тіл у охолоджувальну рідину, що не змішується. Проаналізовано вплив ряду параметрів, які залежать від температури, на характер впровадження розплавленого об'єму у рідке середовище і його переміщення в ній, формоутворення і сфероїдизацію тіла, що відливається. Визначені раціональні умови проведення процесу лиття, які забезпечують його ефективність.

On a base of the termohydrodynamic Numbers and undimension correlations spherical bodies casting process into the cooling immiscible liquid was studied by physical simulation method. It was analyzed a series of parameters action, depending on temperature, on introducing character of melted volume into the liquid medium and its displacement in the it, forming and sphere shaping of the casted bodies. Rational conditions leading of casting process allow to provide it efficacy were determined.

Ключевые слова: моделирование, литье, шар, охлаждающий расплав.

Процесс литья металлических шаров в несмешивающемся расплаве зависит от многих факторов (тепловых, гидродинамических, поверхностных и других) и еще недостаточно изучен [1-4]. Образование шара в жидкой среде сопровождается изменением межфазной поверхности несмешивающихся неизотермических жидкостей и колебаниями ее формы. Процесс формирования сферической межфазной поверхности усложняет то, что он протекает в нестационарных условиях теплообмена на локальных участках охлаждающегося и затвердевающего объема, внедренного в менее нагретый расплав.