

УДК 669.046:621.74.04

*С.В. Фейлер<sup>1</sup>, А.Н. Черепанов<sup>2</sup>, Е.В. Протопопов<sup>1</sup>, Р.Ф. Калимуллин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет

<sup>2</sup> Институт теоретической и прикладной механики СО РАН (г. Новосибирск)

## ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ИНОКУЛЯТОРОВ И ТЕХНОЛОГИИ ПОДАЧИ МАТЕРИАЛА ПРИ МОДИФИЦИРОВАНИИ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ\*

Повышение требований к качеству непрерывнолитых заготовок, в частности, улучшению макроструктуры в направлении снижения химической неоднородности металла, требует разработки новых технических решений по модифицированию жидкой стали добавками тугоплавких соединений, инициирующих кристаллизацию.

Для выбора и обеспечения наибольшей эффективности технологии использования таких материалов в качестве катализатора процесса зарождения кристаллов необходимо соблюдение ряда условий, в том числе: размеры частиц не должны значительно превышать дебаевский радиус поглощения для данного вещества; вещество частицы должно быть как можно более тугоплавким и не растворимым в окружающем металле; вещество должно обладать проводимостью металлического типа [1]. Отмеченным требованиям в полной мере соответствуют такие соединения, как нитрид титана TiN, нитрид циркония ZrN, диборид циркония ZrB<sub>2</sub>. Модифицирование металла желательнее проводить частицами вещества радиусом 1 – 10 нм.

Получение ультрадисперсных тугоплавких нанопорошковых материалов для металлургических процессов в настоящее время возможно путем плазмохимического и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [2, 3].

Для проведения промышленных исследований модифицирования металла при непрерывной разливке стали использовали нитрид титана, карбонитрид титана и более дешевый и доступный оксид иттрия. При применении оксида иттрия на сортовой машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» были значительно улучшены показатели макроструктуры [4]. Композиции тугоплавких соединений нитрида титана TiN с размером частиц 0,04 мкм получены методом плазмохимического синтеза в плакирующей матрице из металлического хрома при соотношении содержаний нитрида титана и хрома TiN:Cr = 1:1, а карбонитрида титана TiC<sub>x</sub>N<sub>y</sub> с размером частиц 0,015 – 0,040 мкм – методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в плакирующей матрице из углеродистой стали при соотношении содержаний карбонитрида и железа TiC<sub>x</sub>N<sub>y</sub>:Fe = 1:1.

Подачу гранулированных композиций нанопорошков-инокуляторов (НПИ) TiN – Cr и TiC<sub>x</sub>N<sub>y</sub> – Fe, закатанных в стальную ленту с требуемым линейным наполнением, возможно производить с помощью трайбаппарата в кристаллизатор и (или) промежуточный ковш машины непрерывного литья заготовок.

Выполненные на первом этапе исследования процесса модифицирования металла НПИ в промежуточном ковше и кристаллизаторе сортовой машины непрерывного литья заготовок ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» позволили оценить эффективность модифицирования по концентрации основного вещества НПИ в стали (см. таблицу). Результаты исследований показали, что при подаче НПИ в кристаллизатор не удастся достичь рекомендуемых значений концентрации модифицирующих соединений в стали, в то время как при введении НПИ в промежуточный ковш возможно в более широких пределах варьировать концентрацию этих соединений, обеспечивая получение расчетных значений при высокой технологичности производственного процесса. Это гарантирует улучшение макроструктуры непрерывнолитых заготовок.

### Технологические параметры модифицирования металла

Сталь	$t_{п.к}^{\circ}$ °C	$v_p$ м/мин	$v_{п.л}^{\circ}$ м/мин	$C_{НПИ}/C_{ОВ}^{\circ}$ %
Кристаллизатор сортовой МНЛЗ (150×200 мм), композиция TiN – Cr				
СтЗсп	1560	1,80	2,20	0,006/0,003
Промежуточный ковш сортовой МНЛЗ (150×150 мм), композиция TiN – Cr				
СтЗсп	1549	2,40	4,30	0,033/0,016
СтЗсп	1549	2,40	2,00	0,015/0,008
СтЗсп	1543	2,40	7,50	0,047/0,024
Промежуточный ковш сортовой МНЛЗ (150×150 мм), композиция TiC <sub>x</sub> N <sub>y</sub> – Fe				
СтЗсп	1557	2,30	3,75	0,068/0,034
СтЗсп	1565	2,10	3,75	0,046/0,023

Примечание.  $t_{п.к}$  – температура металла в промежуточном ковше;  $v_p$  – скорость разливки;  $v_{п.л}$  – скорость подачи порошковой ленты;  $C_{НПИ}$  – концентрация нанопорошкового инокулятора в стали;  $C_{ОВ}$  – концентрация основного вещества НПИ в стали

\* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки РФ (Соглашение № 14.В37.21.0071).

Перспективным следует считать использование таких материалов для оптимизации процессов разлива и кристаллизации расплава на слябовых МНЛЗ.

**Выводы.** Промышленные исследования показали, что независимо от способа получения нанопорошковых материалов введение нанопорошков-инокуляторов в промежуточный ковш машины непрерывного литья заготовок является предпочтительным и обеспечивает высокую технологичность модифицирования металла по сравнению с подачей материала в кристаллизатор.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Комшуков В.П., Черепанов А.Н., Протопопов Е.В.

и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2008. № 8. С. 10, 11.

2. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов / В.П. Сабуров, А.Н. Черепанов, М.Ф. Жуков и др. – Новосибирск: Наука, 1995. – 344 с.

3. Гальченко Н.К., Самарцев В.П., Колесников К.А., Фойгт Д.Б. – В кн.: Сборник трудов Международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов. – Томск: ИФПМ СО РАН, 2009. С. 482, 483.

4. Комшуков В.П., Черепанов А.Н., Протопопов Е.В. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2008. № 10. С. 21 – 24.

© 2012 г. С.В. Фейлер, А.Н. Черепанов, Е.В. Протопопов, Р.Ф. Калимуллин

Поступила 31 октября 2012 г.

УДК 669.046:62 – 503.5

**Г.В. Макаров, В.Ф. Евтушенко**

Сибирский государственный индустриальный университет

### ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДОБИЯ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО КОНТРОЛИРУЕМЫМ ВОЗМУЩЕНИЯМ\*

Обеспечение подобия систем управления натурным объектом и его физической моделью, как это было показано ранее<sup>1</sup>, связано с выполнением условия  $\varphi_w^o(s) = \varphi_w^f(s)\varphi_k(s)$ , где  $\varphi_w$  – оператор преобразования контролируемых возмущений  $w_k$ ;  $\varphi_k$  – корректирующий оператор; индексы «о» и «ф» означают принадлежность натурному объекту и физической модели, а индекс «и» – принадлежность каналу преобразования контролируемых возмущений.

Для проверки этого положения проводили численное моделирование при следующих условиях. Известны математические модели двух систем регулирования по контролируемым возмущениям, одна из которых рассматривалась как система регулирования натурального объекта, а другая – как физической модели. Математическая модель каналов преобразования контролируемых возмущений и регулирующих воздействий представлена в виде последовательного соединения инерционного звена первого порядка и звена чистого запаздывания. Коэффициенты моделей изменялись в следующих пределах:  $0,1 \leq k^o = k^f \leq 1$ ;  $100 > T^o < 500$  и  $20 < T^f > 100$ ;  $10 > \tau^o > 50$  и  $2 < \tau^f > 10$ ; здесь  $k$ ,  $T$  и  $\tau$  – соответственно коэффициент передачи, постоянная времени и время чистого запаздывания (в секундах).

Объект подвержен влиянию неконтролируемых возмущений, приведенных к регулируемому входу.

Контролируемые и приведенные возмущения представляли суммой детерминированной и случайной составляющих. Значения приведенных возмущений изменяли в диапазоне  $1 \div 5\%$  от среднего уровня контролируемых возмущений. Эффективность работы систем оценивали среднемодульной ошибкой регулирования. Моделирование проводили как при введении корректирующего оператора  $\varphi_k$ , так и без него. Этот оператор, полученный из приведенного выше условия, представляет собой последовательное соединение интегро-дифференцирующего звена и звена запаздывания, либо упредителя в зависимости от  $\delta\tau = \tau_u - \tau_w$ , где индекс «и» – означает принадлежность каналу преобразования регулирующих воздействий.

Значения коэффициентов  $T$  и  $\tau$  изменяли с шагом, равным 0,5 с для времени чистого запаздывания, и 5 с для постоянной времени. Значения контролируемых возмущений для обеих систем были одинаковы. Расчеты проводили при различных соотношениях коэффициентов  $T_w$ ,  $T_u$ ,  $\tau_w$  и  $\tau_u$ .

Из результатов моделирования следует. Без корректирующего оператора  $\varphi_k$  отклонения среднемодульных ошибок регулирования обеих систем друг от друга изменялись в диапазоне 40 – 200 %. С этим оператором значения среднемодульных ошибок регулирования обеих систем при отсутствии неконтролируемых возмущений практически совпадали, а при их наличии – не превышали пятипроцентного уровня, что подтверждает подобие рассмотренных систем при выполнении условия  $\varphi_w^o(s) = \varphi_w^f(s)\varphi_k(s)$ .

© 2012 г. Г.В. Макаров, В.Ф. Евтушенко  
Поступила 26 октября 2012 г.

\* Работа выполнена в рамках государственного задания № 7.4916.2011 Министерства образования и науки на выполнение СибГИУ научно-исследовательских работ.

<sup>1</sup> Мышляев Л.П., Евтушенко В.Ф., Зельцер С.Р. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 11. С. 65 – 67.