

ДЮДКИН Д.А. (ОАО «ЗАВОД «УНИВЕРСАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ»),
БАБАНИН А.Я. (НПО «ДОНИКС»), БЕЛОУСОВ В.В. (ДОННУ)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКОВ РАСПЛАВА В ПРИЕМНОЙ СЕКЦИИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОВША СЛЯБОВОЙ МНЛЗ

Разработана математическая модель и представлены результаты моделирования гидродинамики потоков металла в приемной секции трехсекционного промежуточного ковша слябовой МНЛЗ.

Непрерывная разливка стали является завершающим звеном металлургического процесса производства непрерывнолитых заготовок.

Предшествующие непрерывной разливке современные технологии внепечной обработки стали включают ее рафинирование, модифицирование и микролегирование химически активными элементами, которые существенно улучшают ее качество и стабилизируют механические свойства готового проката.

Однако, образуемые в процессе непрерывной разливки эндогенные и экзогенные неметаллические включения (НВ) (величина которых может достигать 30–70%), попадая из промежуточного ковша (ПК) в кристаллизатор, загрязняют непрерывнолитую заготовку, что существенно ухудшает ее качество [1].

Постоянное повышение требований к качеству металлопродукции ставит задачу по сохранению высокой степени чистоты стали, полученной при ее рафинировании в сталеразливочной ковше на УДМ, до кристаллизации при разливке на МНЛЗ, исключив негативные последствия вторичного окисления. Для решения этой задачи последние годы отмечается устойчивая тенденция в использовании промежуточного ковша (ПК) МНЛЗ в качестве агрегата внепечной обработки стали. Эффективность его использования, в частности, для удаления НВ, в значительной мере зависит от организации гидродинамических потоков расплава [2].

Поэтому, изучение гидродинамики циркуляционных потоков металла в промежуточном ковше МНЛЗ является актуальной задачей для возможности ее оптимальной организации при разработке современных технологий рафинирования стали от вредных примесей и неметаллических включений.

Целью настоящей работы является изучение методом математического моделирования гидродинамики циркуляционных потоков металла в приемной секции трехсекционного промежуточного ковша.

В данной работе рассматривается трехсекционный ПК двухручьевого слябовой МНЛЗ, состоящий из центральной приемной секции и двух боковых разливочных.

В процессе непрерывной разливки (рис.1) жидкий металл из сталеразливочного ковша (1) через защитную трубу (2) поступает в приемную секцию ПК (5) и далее через каналы, расположенные в перегородках (6), перетекает в разливочные секции (4), из которых попадает в кристаллизаторы (8).

Конструкция и расположение проточных каналов между секциями представлена на рис.2. Два нижних канала имеют прямоугольную форму сечением 100×90 мм, верхний — круглую диаметром 70 мм.

Для данной конструкции ПК существенное значение представляет гидродинамика потоков расплава в приемной секции, которая формирует общую гидродинамическую картину и определяет эффективность протекающих рафинировочных процессов.

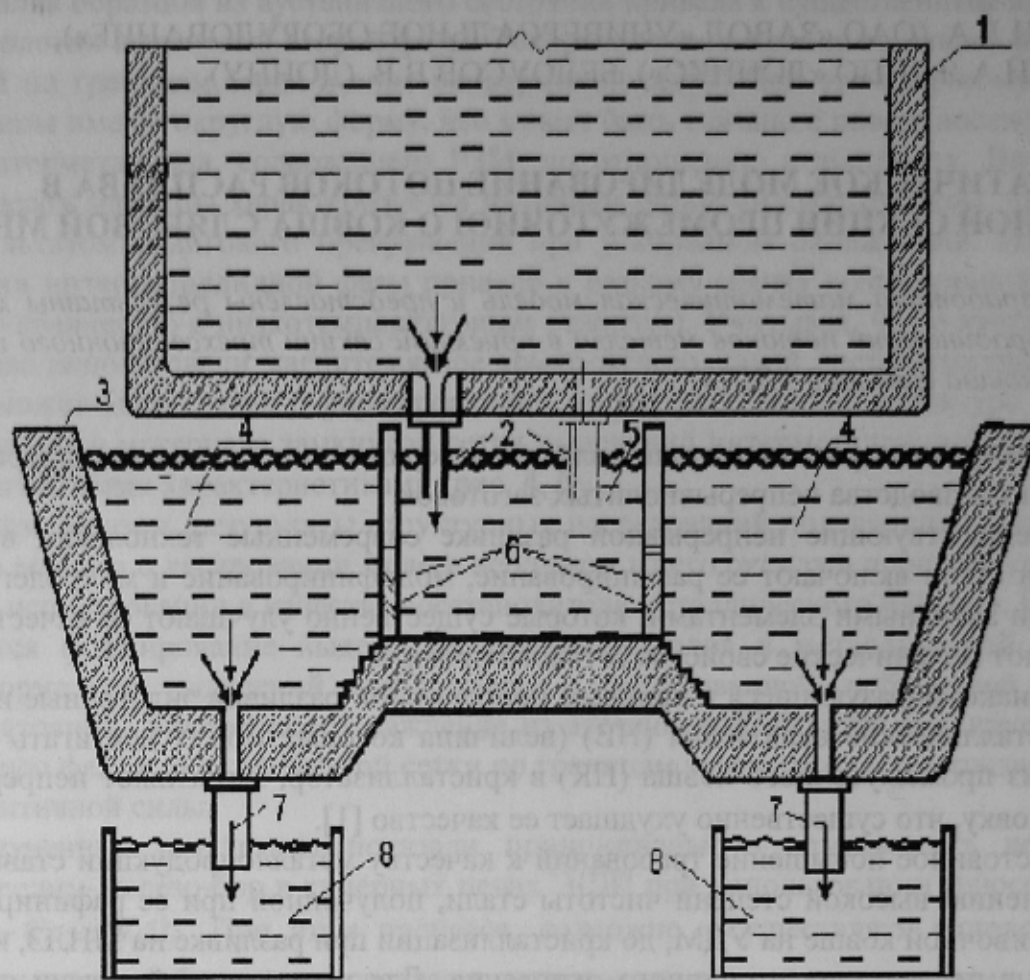


Рис. 1. Схематическое изображение процесса непрерывной разливки стали на двух-ручьевалях МНЛЗ: 1 — сталеразливочный ковш; 2 — защитная труба; 3 — трехсекционный промежуточный ковш; 4 — разливочные секции; 5 — приемная секция; 6 — перегородки с фильтрационными каналами; 7 — сталеразливочные стаканы; 8 — кристаллизаторы

В основу разработанной математической модели положены уравнения Навье-Стокса и неразрывности, описывающие гидродинамические и теплофизические процессы, которые в критериальной форме имеют вид [2]:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial Fo} + \vec{V} \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} = Pr \left(\frac{\partial^2 \vec{V}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{V}}{\partial y^2} \right); \quad (1)$$

$$0 = -\nabla \bar{V}, \quad (2)$$

где \vec{V} — скорость истечения расплава, м/с; $Fo = at/x_0^2$ — критерий Фурье, характеризующий нестационарность процесса; $Pr = \nu/a$ — критерий Прандтля, характеризующий отношение динамических сил к тепловым в расплаве; a — коэффициент температуропроводности, м²/с; t — текущее время, с; x_0 — характерный размер (длина приемной секции), м; ν — коэффициент кинематической вязкости, м²/с; x, y — текущие координаты, м; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ — оператор Лапласа; $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}$ — оператор Гамильтона.

При решении данной задачи приняты следующие допущения:

- струя расплава, поступающая из сталеразливочного ковша в приемную секцию, идеально организована;
- зеркало металла в приемной секции неподвижно и покрыто слоем защитного шлака;
- в начале разливки первой плавки в серии (при заполненном ПК перед открытием стопоров) расплав в разливочных и в приемной секциях находится в неподвижном состоянии;
- в трех плоскостях сечения промковша, где располагаются проточные каналы, расходы металла одинаковы; это позволяет рассмотреть одно центральное сечение с учетом, что часть расплава перетекает в разливочные секции через другие два сечения, т.е. в данной постановке рассматривается 1/3 расхода поступающего в приемную секцию металла.

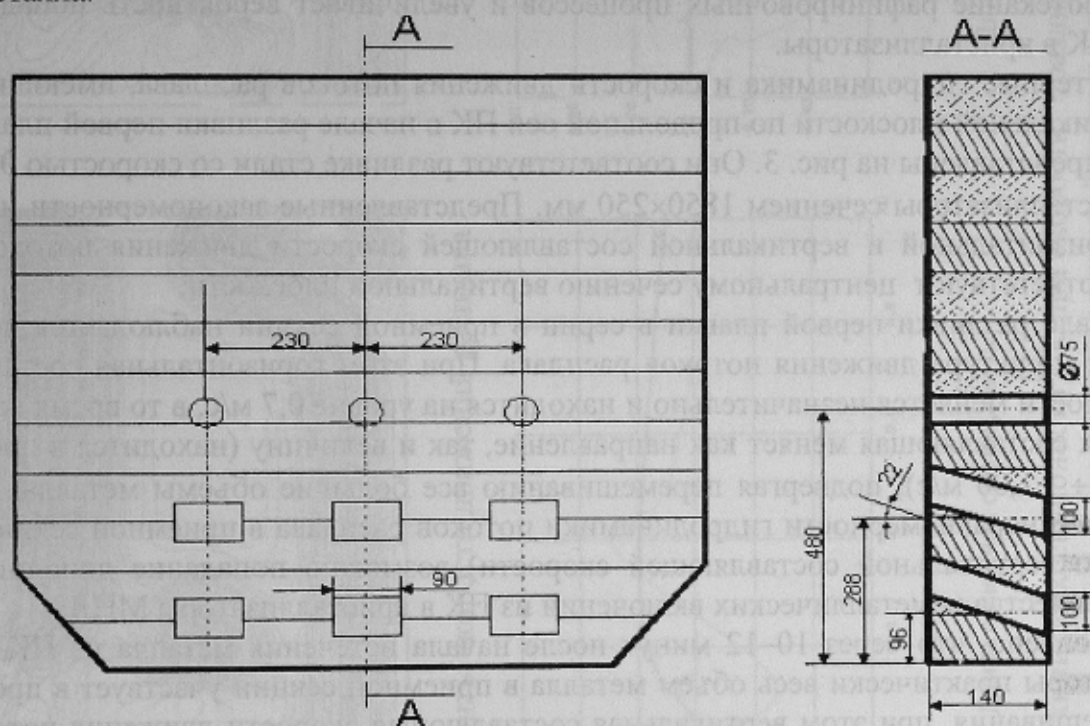


Рис.2. Конструкция и расположение проточных каналов в перегородках ПК

Определены следующие граничные условия:

- скорость движения расплава у продольных стенок приемной секции равна 0;
- скорость движения расплава на входе в проточный канал определяется исходя из скорости поступления расплава в приемную секцию и высоты жидкого металла над каналами из формул:

$$V_m = (2gh)^{1/2}, \quad (3)$$

$$\frac{V_m}{3} = V_m^1 + V_m^2 + V_m^3, \quad (4)$$

где V_m — скорость поступления металла в приемную секцию, м/с; g — ускорение свободного падения, м/с²; h — расстояние от зеркала металла до верхнего края канала, м; V_m^1, V_m^2, V_m^3 — скорости движения металла соответственно в верхнем, среднем и нижнем каналах одного вертикального сечения, м/с.

Задача реализовалась численно конечно-разностными методами на неравномерной пространственной и временной сетках с привлечением методов возмущенного оператора, разности против потока, интегро-интерполяционного метода и прогонки. Все

привлеченные методы обеспечивают высокую степень аппроксимации и устойчивость решения нелинейных, многомерных дифференциальных уравнений [3].

Разработанная математическая модель, в сравнении с известными [4, 5], позволяет определить гидродинамику потоков расплава, направлений и скоростей их движения в любой области приемной секции и в любой момент времени разливаемой серии плавков.

В результате математического моделирования установлено (рис. 3), что гидродинамика потоков расплава в приемной секции существенно меняется в процессе разливки серии плавков и имеет нестабильные периоды, которые наблюдаются в начале разливки первой плавки в серии и при переходе разливки с плавки на плавку.

Данные периоды характеризуются неустойчивыми циркуляционными потоками, образованием застойных зон и зон прямого течения металла в разливочные секции, что ухудшает протекание рафинировочных процессов и увеличивает вероятность попадания НВ из ПК в кристаллизаторы.

Характерные гидродинамика и скорости движения потоков расплава, имеющие место в вертикальной плоскости по продольной оси ПК в начале разливки первой плавки в серии, представлены на рис. 3. Они соответствуют разливке стали со скоростью 0,7 м/мин в кристаллизаторы сечением 1850×250 мм. Представленные закономерности изменения горизонтальной и вертикальной составляющей скорости движения потоков расплава соответствуют центральному сечению вертикальной плоскости.

В начале разливки первой плавки в серии в приемной секции наблюдается неравномерная структура движения потоков расплава. При этом горизонтальная составляющая скорости меняется незначительно и находится на уровне 0,7 м/с, в то время как вертикальная составляющая меняет как направление, так и величину (находится в пределах $-1,40 \div +1,00$ м/с), подвергая перемешиванию все большие объемы металла. В данный период неравномерности гидродинамики потоков расплава в приемной секции (особенно по вертикальной составляющей скорости) возможно попадание дополнительного количества неметаллических включений из ПК в кристаллизаторы МНЛЗ.

Установлено, что через 10–12 минут после начала истечения металла из ПК в кристаллизаторы практически весь объем металла в приемной секции участвует в процессе перемешивания, при этом вертикальная составляющая скорости движения потоков расплава значительно стабилизируется как по величине, так и по направлению.

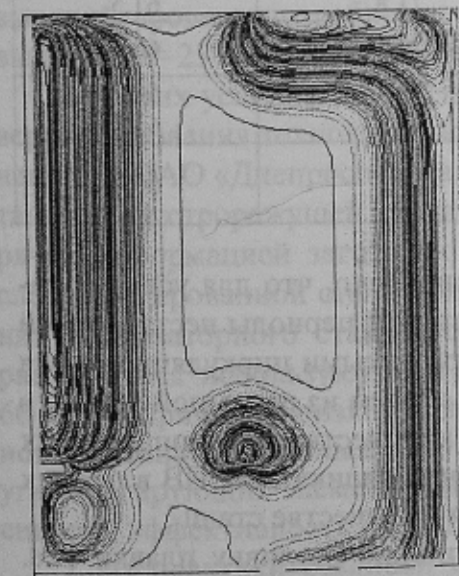
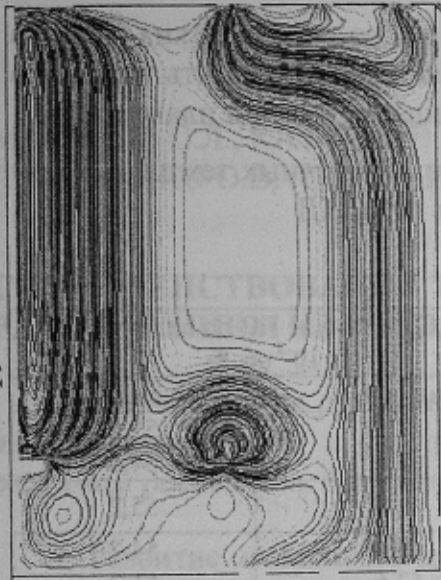
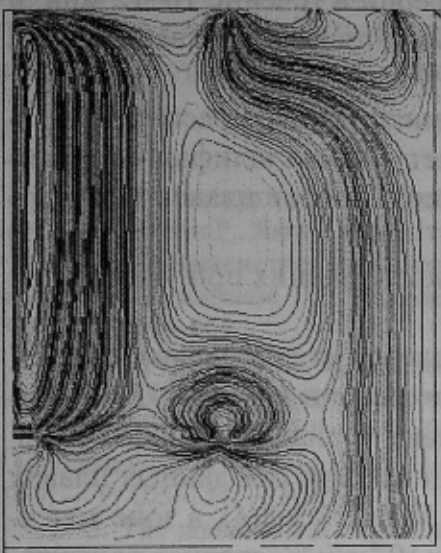
В установившемся режиме в приемной секции наблюдаются три характерные области движения потоков расплава, примерно равные по высоте и охватывающие соответственно по 30–35% объема металла.

Верхняя и средняя области характеризуются замкнутыми циркуляционными потоками, движущимися по малому и большому контурам, расположенным соответственно справа и слева от места подвода металла в ПК. Нижняя область характеризуется направленным движением металла от места подвода к разливочным секциям с равномерной интенсивностью перемешивания.

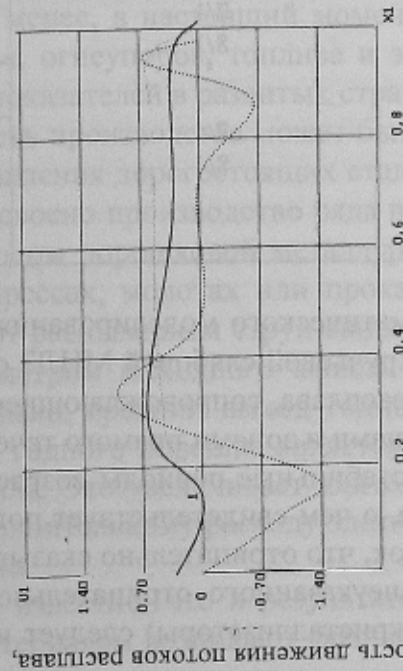
В период перехода разливки с плавки на плавку прекращается подача металла из сталеразливочного ковша и его уровень в ПК уменьшается до 0,4–0,5 м, а циркуляционные потоки замедляются.

Подача металла из сталеразливочного ковша последующей плавки, производимая через противоположно расположенный шибер, приводит к полному затуханию существующих и формированию новых циркуляционных потоков. При этом гидродинамика потоков расплава имеет аналогичный вид, представленный на рис. 3 (в), но с противоположным расположением относительно места подвода металла. Время формирования данной гидродинамики составляет 8–10 мин. от открытия шиберов сталеразливочного ковша последующей плавки.

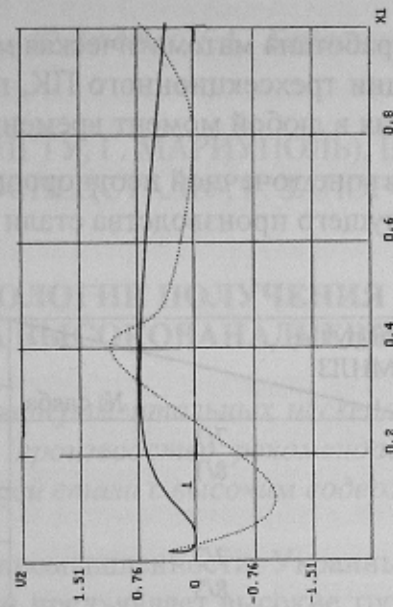
Линии функции тока



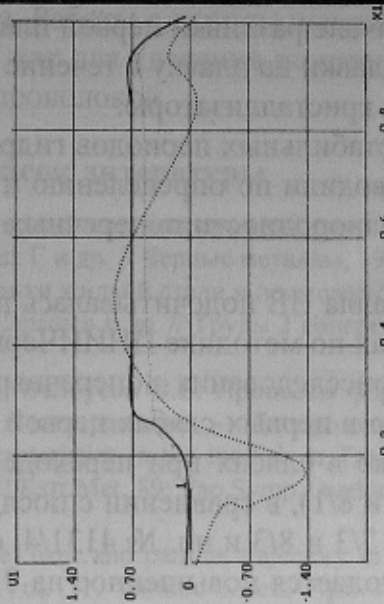
Компоненты скорости движения расплава



Длина приемной секции, часть *a*



Длина приемной секции, часть *б*



Длина приемной секции, часть *с*

Рис. 3. Гидродинамика потоков расплава в приемной секции трехсекционного ПК при скорости разливки металла 0,7 м/мин и работающем левом шибере сталеразливочного ковша: *a, б, в* — время от начала разливки первой плавки в серии, соответственно 3, 8 и 12 мин; пунктирная линия (вертикальная) — составляющая (V_1); сплошная линия (горизонтальная) — составляющая (V_2).

Следовательно, в начале разливки первой плавки в серии в течение 10–12 мин. и при переходе разливки с плавки на плавку в течение 8–10 мин. повышается вероятность к затягиванию НВ из ПК в кристаллизаторы.

Оценку влияния нестабильных периодов гидродинамики потоков расплава на загрязненность металла проводили по определению и подсчету НВ на шлифах, вырезанных из зоны точечной неоднородности поперечных темплетов слябов плавков текущего производства.

Загрязненность металла НВ подсчитывалась по 20 полям зрения при увеличении $\times 400$ в объемных процентах по методике ЦНИИЧермет.

Проведенные микроисследования поперечных темплетов стали марки 10ХСНД (табл.1) подтверждают, что в первых слябах первой плавки в серии (пл. № 4128/1, слябы №№ 7/1 и 8/1), а также в слябах при переходе разливки с плавки на плавку (пл. № 4131/4, слябы №№ 7/1 и 8/1), в сравнении с последующими слябами данных плавков (пл. № 4128/1, слябы №№ 7/3 и 8/3 и пл. № 4131/4, слябы №№ 7/4 и 8/4), в зоне точечной неоднородности наблюдается повышенное на $7,9-9,7 \times 10^{-3}$ об./% среднее содержание силикатных НВ, что соответствует увеличению их количества в первых слябах на 12–13% абс.

Таким образом, разработана математическая модель гидродинамических потоков расплава в приемной секции трехсекционного ПК, позволяющая определять направления и скорости их движения в любой момент времени разливаемой серии плавков.

Табл. 1. Содержание НВ в зоне точечной неоднородности в поперечных темплетях слябов текущего производства стали марки 10ХСНД

№ плавки	№ плавки в серии	№ ручья МНЛЗ	№ сляба	Содержание НВ по видам, $\times 10^{-3}$ об. %	
				силикаты	Сульфиды
4128/1			7/1	58,9	55,6
			8/1	63,6	54,8
Ср. знач.				61,3	55,2
4128/1			7/3	49,4	54,7
			8/3	53,6	51,2
Ср. знач.				51,6	53,0
4131/4			7/1	68,3	58,7
			8/1	71,8	61,5
Ср. знач.				70,1	60,1
4131/4			7/4	61,1	59,5
			8/4	63,2	61,3
Ср. знач.				62,2	60,4

В результате математического моделирования установлено, что для условий работы 43-тонного ПК двухручьевого слябовой МНЛЗ существуют периоды нестабильной гидродинамики потоков расплава, сопровождающиеся неразвитыми циркуляционными потоками, застойными зонами и зонами прямого течения металла из приемной секции в разливочные. В такие нестабильные периоды возрастает количество НВ, попадающих из ПК в кристаллизаторы, о чем свидетельствует повышение силикатных НВ в первых слябах разливаемых плавков, что отрицательно сказывается на качестве стали.

Для снижения вышеуказанного отрицательного влияния разливку плавки (т.е. подача металла из ПК в кристаллизаторы) следует начинать только после наполнения

ПК до номинального объема металла. Работы в данном направлении являются перспективными в плане использования ПК как для удаления неметаллических включений так и для обработки стали порошковой проволокой.

Список литературы

1. **Металлургическая** обработки металла при непрерывной разливке с целью повышения степени чистоты // Яук Р., Якоби Х., Литтгершайдт Г и др. // Черные металлы, 1989. — № 6. — С. 3–11.
2. **Совершенствование** гидродинамики жидкой стали в промежуточном ковше при непрерывной разливке / З.К. Кабаков, Г.А. Волков, А.Ф. Сарычев и др. // Труды 2 конгресса сталеплавателей. — М., 1994. — С. 299–301.
3. **Огурцов А.П., Недопекин Ф.В., Белоусов В.В.** Процессы формирования стального слитка: математическое моделирование заполнения и затвердевания. — Днепродзержинск: ДГТУ, 1994. — 180 с.
4. **Optimization** of the fluid flow characteristics in the tundish in Tata Steels six-strand billet caster / S.Govindarain, S.K. Aimani, Amit Chatterjee // Extr.Met. 89: Pap.Symp.London, 10–13 July, 1989. — London, 1989. — P. 105–134. — Англ.
5. **The mathematical** modelling of steel flow and particle trajectory in two strands slab tundish / K.C. Hsu, C.L. Chou // 71st Steelmak. Conf. Proc.Vol. 71. Toronto Meet., Apr. 17–20, 1988.- (Wazendale Pa), 1988. — P. 405–410. — Англ.

© Дюдкин Д.А., Бабанин А.Я., Белоусов В.В., 2003

МАКУРОВ С.Л., КАЗАЧКОВ Е.А. (ПГТУ, Г. МАРИУПОЛЬ), ШТУРГУНОВ И.Л.,
ЛИМАРЕНКО О.В. (ОАО «ДНЕПРОСПЕЦСТАЛЬ», Г. ЗАПОРОЖЬЕ)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКА РАСПЫЛЕНИЕМ ИЗ РАСПЛАВА ВЫСОКОВАНАДИЕВОЙ СТАЛИ

Представлены результаты экспериментальных исследований, на основании которых разработаны и внедрены в производство рекомендации по температурным режимам распыления быстрорежущей стали с высоким содержанием ванадия.

Развитие металлургической промышленности Украины в условиях рыночной экономики и свободной конкуренции предъявляет высокие требования к качеству продукции, которые рассматриваются в тесной связи со снижением ее себестоимости на всех стадиях производства. Тем не менее, в настоящий момент в стране имеет место высокий уровень потребления сырья, огнеупоров, топлива и энергии (эти показатели выше на 20–25% соответствующих показателей в развитых странах).

В этих условиях эффективность производства может быть повышена за счет совершенствования технологий изготовления дорогостоящих сталей специального назначения. В ОАО «Днепроспецсталь» освоено производство ряда новых марок инструментальной быстрорежущей стали методом порошковой металлургии с последующей горячей деформацией заготовок на прессах, молотах или прокатных станах. Порошок сложнолегированной стали получают распылением струи жидкого металла при истечении из дозаторного стакана с диаметром выходного канала 6 мм (в качестве газораспылителя используют азот). Однако, средний выход годного порошка составляет 60–65%. Причиной низкого выхода годного порошка является «затягивание» дозаторного стакана при распылении металла. Это увеличивает длительность плавки, ведет к угару легирующих элементов и дополнительному расходу электроэнергии, а в целом — снижает эффективность производства.

Из практики разливки стали известно, что в результате длительного контакта жидкого металла с огнеупорным материалом возникают физико-химические процессы,