УДК 621.74.06

З.К. Кабаков, Н.Е. Хисамутдинов, Д.И. Бородин, И.Ю. Мазина

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТА УСТАНОВКИ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ МЕТАЛЛА С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОДВЕШИВАНИЕМ

В статье приводятся результаты исследования магнитного поля в рабочем зазоре электромагнита установки для непрерывного литья с электромагнитным подвешиванием. На основе этих данных проводится обоснование параметров электромагнита.

Магнитное поле, электромагнит, установка для непрерывного литья, электромагнитное подвешивание.

The results of the research of the magnetic field in the electromagnet gap of installation for continuous casting with electromagnetic suspension are presented in the article. The substantiation of the parameters of the electromagnet is carried out on the basis of these data.

Magnetic field, electromagnet, installation for continuous casting, electromagnetic suspension.

В настоящее время накоплен большой опыт применения электромагнитных явлений в металлургической промышленности: индукционная печь, электромагнитный перемешиватель, электромагнитный тормоз, электромагнитные системы управления потоками жидкого металла, электромагнитные устройства для воздействия на жидкий металл, электромагнитные кристаллизаторы. Технологии с применением электромагнитных полей обладают большим потенциалом в области улучшения качества производимого металла, а потому интерес к ним не ослабевает. Совершенствуются уже существующие устройства и разрабатываются новые.

В работах [1] – [3] приведен метод, при котором жидкий металл можно привести во взвешенное состояние под действием поля электромагнитных сил, возникающего при скрещении во взаимно перпендикулярных направлениях постоянного магнитного поля и постоянного электрического тока $\left(f = i \cdot B\right)$. Преимущество данного способа литья состоит в возможности производить заготовки малого размера с чистой поверхностью в связи с отсутствием контакта с охлаждающей поверхностью. Установка для горизонтальной непрерывной разливки с электромагнитной поддержкой (УНРЭП) предназначена для получения плоских и круглых заготовок малого размера. Схема установки приведена на рис. 1 а.

При проектировании установки необходимо знать длину и высоту полюсов, а также картину магнитного поля, распределение индукции в рабочем зазоре электромагнита и плотность тока, пропускаемого через струю. В найденных источниках [1] – [3] подобные сведения отсутствуют.

В данной работе для обоснования этих параметров выполнено исследование картины магнитного поля в рабочем зазоре электромагнита в конструкции УНРЭП, получено условие взвешивания струи.

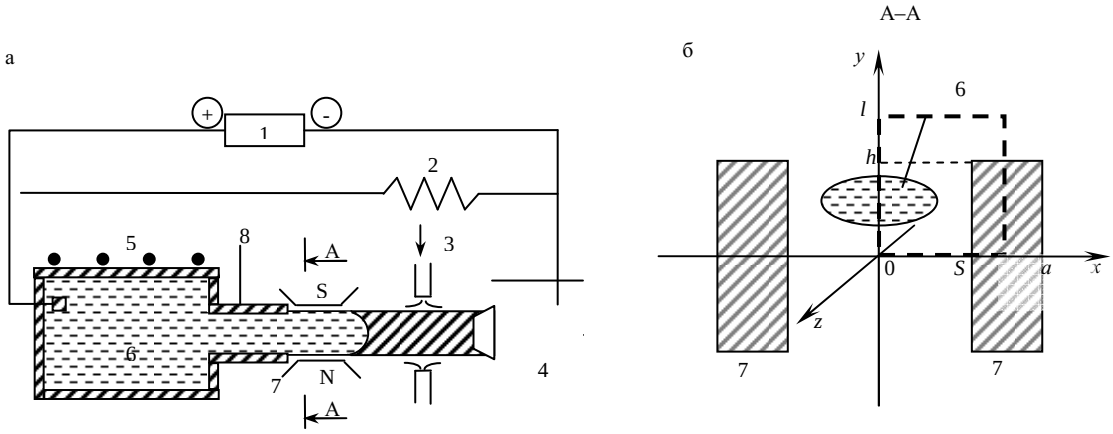


Рис. 1. Схема опытного оборудования для горизонтальной электромагнитной разливки:

а – вид сверху; б – сечение А–А (повернуто на 90°); 1 – снабжение постоянным током; 2 – сопротивление; 3 – охлаждающий газ; 4 – электрод-затравка; 5 – индуктор для нагрева; 6 – металл; 7 – полюс электромагнита; 8 – термопара; [ ] – расчетная область, S – половина ширины рабочего зазора, *l* – высота расчетной области, *h* – половина высоты полюса электромагнита, *a* – ширина расчетной области

Исследование выполнили с помощью математической модели. При ее разработке предполагалось, что поле в рабочем зазоре является плоскопараллельным (картина поля не зависит от координаты *z*). С учетом симметрии картины поля расчетную область выбрали так, как показано на рис. 1 б. Зазор между полюсами – 30 мм, при максимальном размере сечения заготовки – 10 мм.

Математическая модель включает уравнение Лапласа относительно скалярного потенциала напряженности магнитного поля:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}=0,$$

интегрируемое в области:

$$\{0\le x\le S,\quad 0\le y\le l\}\cup\{S<x\le a,\quad h\le y\le l\}.$$

Граничные условия:
при $x=0,\ 0\le y\le l$:

$$U=0; \qquad (1)$$

при $0\le x\le a,\ y=l$:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}=0; \qquad (2)$$

при $0\le x<S,\ y=0$:

$$\frac{\partial U}{\partial y}=0; \qquad (3)$$

при $x=a,\ h<y\le l$:

$$\frac{\partial U}{\partial x}=0; \qquad (4)$$

при $S\le x\le a,\ y=h$:

$$U=U_n; \qquad (5)$$

при $x=S,\ 0\le y\le h$:

$$U=U_n. \qquad (6)$$

Условие (1) задает нулевой потенциал на оси симметрии (границе $x=0,\ 0\le y\le l$). Условие (2) определяет постоянство потока при переходе через границу $0\le x\le a,\ y=l$. Условия (3) и (4) соответствуют отсутствию потоков через границы $0\le x<S,\ y=0$ и $x=a,\ h<y\le l$. Условия (5) и (6) задают постоянный потенциал на поверхности полюса электромагнита (U_n).

В результате моделирования было получено распределение магнитного потенциала в рабочем зазоре электромагнита. Затем рассчитаны компоненты вектора магнитной индукции по формулам:

$$B_x=\mu_0\frac{\partial U}{\partial x},\quad B_y=\mu_0\frac{\partial U}{\partial y},$$

где $\mu_0=4\pi\cdot10^{-7}\ \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнитная проницаемость вакуума, и доля общего магнитного потока, проходящего от поверхности полюса к плоскости симметрии, по формуле:

$$\varphi=\frac{\Phi(x,y)}{\Phi_1}\cdot100\%,$$

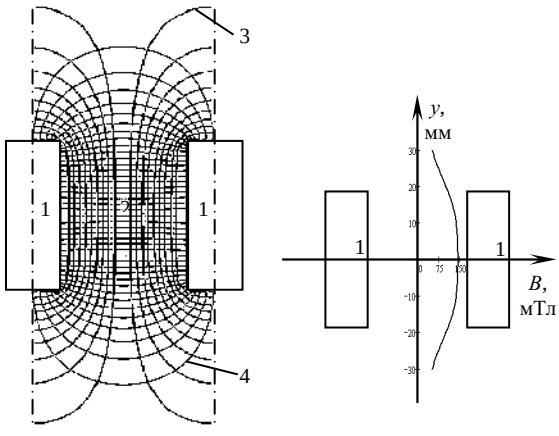
где $\Phi(x,y)=\int_0^y B_x dy'$, $\Phi_1=\int_{\Gamma_5} B_y dx+\int_{\Gamma_5} B_x dy$.

Исходные данные для моделирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	Величина, размерность	Значение величины
1	Половина ширины рабочего зазора, м	0,015
2	Ширина расчетной области, м	0,025
3	Длина расчетной области, м	0,060
4	Половина высоты магнита, м	0,018
5	Потенциал обмотки электромагнита, А-витков	3000

Результаты исследования представлены на рис. 2 – 5. На рис. 2 а изображена картина магнитного поля в рабочем зазоре электромагнита. График распределения величины магнитной индукции по высоте в центре рабочего зазора электромагнита показан на рис. 2 б.



а б

Рис. 2. Магнитное поле в зазоре электромагнита:

а – картина магнитного поля, б – распределение магнитной индукции по координате *y* в плоскости симметрии полюсов; 1– полюс электромагнита, 2 – рабочий зазор, 3 – эквипотенциали, 4 – магнитные силовые линии

Заметим, что существенное снижение индукции по высоте полюса наблюдается на расстоянии $l_1 = 10$ мм от верхнего или нижнего края полюса (рис. 2 б). Этот факт позволяет сделать длины полюса для исследованного размера зазора между полюсами. Так как на участке поддержки струи металла необходимо создавать постоянное значение индукции на расстоянии l_n, то длину полюса необходимо принять равной $l = l_n + 2l_1$.

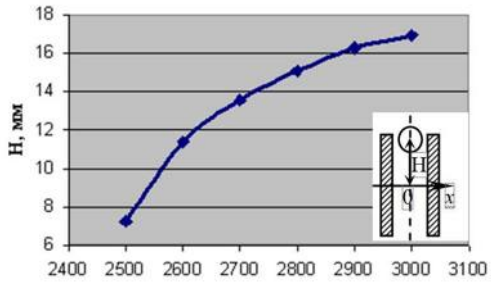
Зная величину индукции между полюсами, можно прогнозировать высоту положения струи металла H в зазоре в зависимости от плотности металла, плотности силы тока в струе жидкого металла и индукции в центре рабочего зазора электромагнита. Принимаем, что индукция по сечению струи постоянна и на сечение равномерно действует объемная сила тяжести. При этих допущениях условие подвешивания струи имеет вид:

$$\int_S F_m dS = \int_S F_n dS ,$$

где S – площадь сечения струи металла, $F_m = \rho g$ – сила тяжести, $F_n = i \cdot B_x(x, y)$ – сила подвешивания элемента струи, ρ – плотность жидкого металла, g – ускорение свободного падения, i – плотность тока в сечении струи, $B_x(x, y)$ – горизонтальная составляющая вектора индукции в сечении струи.

С учетом этого условия определяли *H*. Результаты представлены на рис. 3 и 4.

Полученные данные позволяют определить основные конструктивные и технологические параметры электромагнита горизонтальной установки непрерывной разливки с электромагнитным подвешиванием металла.



Потенциал обмотки, А-витков

Рис. 3. Зависимость высоты положения струи металла от магнитного потенциала обмотки

а



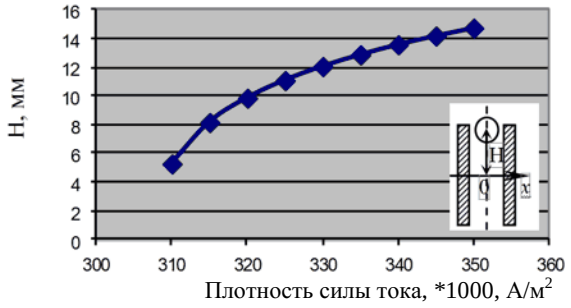
Плотность силы тока, *1000, А/м^2

б



Плотность силы тока, *1000, А/м^2

в



Плотность силы тока, *1000, А/м^2

Рис. 4. Зависимости высоты положения струи металла от плотности силы тока для различных металлов:
а – алюминий $\left(\rho = 2700 \frac{кг}{м^3}\right)$; б – силумин $\left(\rho = 2600 \frac{кг}{м^3}\right)$;
в – титан $\left(\rho = 4500 \frac{кг}{м^3}\right)$.

Литература

1. *Каваками, К.* Модернизация технологических процессов в черной металлургии Японии / К. Каваками // Черные металлы. – 1988. – № 13. – С. 3 – 12.

2. *Asai, S.* Birth and resent activities of electromagnetic processing of materials / S. Asai // ISIJ International. – V. 29 (1989). – № 12. – P. 981 – 992.

3. *Takeuchi, S.* Stability analysis of free surface of liquid metals levitated by electromagnetic force / S. Takeuchi, J. Etay, M. Garnier // ISIJ International. – V. 29 (1989). – № 12. – P. 1006 – 1015.