

УДК 532.516: 669

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА  
ПРИ ДВИЖЕНИИ МЕТАЛЛА В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ И  
ПРОБЛЕМА ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ К ВНЕПЕЧНОЙ ДЕГАЗАЦИИ СТАЛИ**

*Н.И.Захаров\*, Д.А.Дюдкин\*, Ф.В.Недопекин,*

*\*Донецкий национальный технический университет*

Одним из направлений решения вопросов внепечной дегазации стали является применение методов электрофизического воздействия на металл. Это воздействие обладает большими потенциальными возможностями вследствие существенного влияния на интенсификацию технологий [1]. Актуальной является проблема энерго- и ресурсосбережения при использовании электростатического поля в этих технологиях [2].

В связи с этим целесообразно обсудить проблему приложения новых научных результатов [3], которые могут создать основу для объяснения механизма, разработки математического описания и оптимизации рассматриваемых технологий внепечной дегазации стали.

Как показали экспериментальные исследования [3], при движении металлического проводника в кулоновском поле, формируется устойчивый во времени электрический ток.

Рассматриваемый электрический эффект целесообразно объяснить с помощью следующего механизма, используемого в дальнейших разработках: индуцируемый электрический ток суть непрерывная последовательность перераспределений свободных зарядов металла под влиянием внешнего электрического поля. Свободные заряды проводника, подвергнутые действию кулоновского поля, в каждый момент времени стремятся к равновесию с внешним полем.

Общее уравнение переноса, дающее его величину и направление, а также иллюстрирующее механизм переноса, можно записать следующим образом:

$$\vec{j}_{\text{до}} = (\rho - \rho_0) \cdot \vec{v} \quad (1)$$

Здесь:  $\rho$  – текущая плотность свободных зарядов металлического проводника в его поверхностном слое;  $\rho_0$  – аналогичная характеристика в условиях отсутствия источника кулоновского поля;  $\vec{v}$  – скорость дрейфа сгустка ( $\rho - \rho_0$ ) свободных зарядов проводника в области  $\rho > \rho_0$  относительно системы отсчета, жестко связанной с проводником.

Если внешнее поле отсутствует, то  $\rho = \rho_0$  и  $\vec{j} = 0$ . Разность  $(\rho - \rho_0)$  характеризует «динамически удерживаемый» кулоновским полем свободный заряд проводника. При этом:  $\rho = \rho(\vec{E})$ ,  $\vec{E} = \vec{E}(x, y, z)$ .

Экспериментальные исследования [3] показали также, что величина электропереноса возрастает как при увеличении скорости движения проводника относительно источника электростатического поля, так и увеличении его напряженности на поверхности металла, что согласуется с разработанной теоретической моделью.

Таким образом, предложенный механизм электропереноса и его общее уравнение качественно согласуются с экспериментальными данными, не противоречат основным положениям классической электродинамики, а дополняют и углубляют их.

Рассматриваемый эффект – это своего рода «электродинамическая индукция», которая вырождается в электростатическую индукцию при приближении к нулю скорости движения проводника относительно источника кулоновского поля. При этом электростатическая индукция в известном смысле и пределах характеризует дифференциал (бесконечно малую часть, элемент) явления в целом. Напротив, «электродинамическая индукция» суть обобщенный динамический аналог индукции электростатической.

При относительном перемещении металлического проводника и источника внешнего поля, в области действия последнего, на поверхности проводника его свободные заряды образуют сгусток той или иной структуры (при разноименности его зарядов и заряда источника).

В зависимости от скорости релаксации, этот сгусток будет в большей или в меньшей степени размыт. При очень высокой (теоретически – бесконечной) скорости релаксации, либо в случае достаточно медленного относительного движения системы, распределение плотности свободных зарядов проводника в области сгустка в каждый момент времени соответствует динамически равновесному.

Для движущегося проводника на его поверхности происходит непрерывное обновление свободных зарядов в области их «динамического удерживания», т.е. в области сгустка. Захват внешним полем одних частиц (т.е. их попадание в сгусток) сопровождается потерей других. Следовательно, статическое равновесие при электростатической индукции заменяется динамическим в рассматриваемом явлении.

В общем случае, использование уравнения (1) данного эффекта предполагает определение текущей плотности  $\rho$  свободных зарядов металлического проводника в области  $\rho > \rho_0$ .

В рассматриваемом приближении с учетом предложенного механизма переноса электрически заряженных частиц, эпюры динамического (в каждый момент времени) и соответствующего статического распределений предполагаем эквивалентными. Это дает основание определить текущую плотность  $\rho$  свободных зарядов металла, исходя из уравнения Максвелла [4,5]:

$$\operatorname{div} \vec{E}' = 4\pi\rho, \quad \vec{E} = -\vec{E}', \quad (2)$$

где  $\vec{E}, \vec{E}'$  – напряженности внешнего и собственного поля свободных зарядов проводника с плотностью  $\rho$ .

Рассмотрим приложение разработок к технологии внепечной дегазации металла комплексным воздействием вакуума, сосредоточенной продувки аргоном и электростатического поля умеренных напряженностей [6,7]. При расчете системы уравнений конвективного теплопереноса в жидкой ванне, возникает проблема постановки граничного условия на поверхности «вакуум – движущийся металл» при воздействии на нее электростатического поля. Характер распределения ионов удаляемого из расплава газа (азот, водород) по зеркалу металла зависит как от напряженности внешнего поля, так и формы электрода, а также парциального давления газа в вакууматоре и скорости расплава. В первом приближении имеем:

$$C_n = K_E \cdot K_V \cdot K_N \cdot \sqrt{P_{N_2}}, \quad (3)$$

где  $C_n$  – концентрация удаляемого газа на межфазной границе;  $P_{N_2}$  – парциальное давление этого газа в полости вакууматора;  $K_N$  – постоянная Сиверта для рассматриваемого газа.

Безразмерные коэффициенты  $K_E$  и  $K_V$  вводятся таким образом, чтобы при  $E = 0$  зависимость (3) вырождалась в закон Сиверта (для азота и водорода) [8]:

$$C_n = K_N \cdot \sqrt{P_{N_2}}. \quad (4)$$

Количественная зависимость (3) работает в области термо- и электродинамического равновесия системы и умеренных значений напряженности электростатического поля.

#### Выводы

Предложена теоретическая модель процессов переноса при движении металла в электростатическом поле, включающая механизм, общее уравнение и математическую модель электропереноса. Обсуждается проблема ее приложения к технологии внепечной дегазации стали комплексным воздействием вакуума, продувки аргоном и электростатического поля.

#### РЕЗЮМЕ

Запропоновано теоретичну модель процесів переносу при русі металу в електростатичному полі, що включає механізм, загальне рівняння й математичну модель електропереносу. Обговорюється проблема її додатка до технології позапечної дегазації сталі комплексним впливом вакууму, продувки аргоном і електростатичним полем.

#### SUMMARY

The theoretical model processes of transfer for mothion of metal in electrostatic field was proposed. It involve the mechanism, total equation and mathematical model of electrotransfer. Problem of practical using the theoretical model in technology the degassing of steel by complex action vacuum, flosing by inert gas and electrostatic field was discussed.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Кайбичев А.В., Лепинских Б.М. Рафинирование жидких металлов и сплавов в электрическом поле. – М.: Наука. – 1983. – 120 с.
2. Дюдкин Д.А., Захаров Н.И. К вопросу энергосбережения при дегазации металла// Металл и литье Украины. – 1996. – №3. – С.17-18.
3. Дюдкин Д.А., Комаров А.А. \*\*Явление возбуждения электрического тока в проводнике, движущемся в электростатическом поле // Научное открытие. – 2000. – Диплом №149.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. – М.: Наука. – 1988. – Т.2. – 509с.
5. Дюдкин Д.А., Захаров Н.И.// Международная конференция «Металлургия и металлурги 21 века». – М.: МГИ-СиС. – 2001. – С.500-505.
6. Захаров Н.И., Недопекин Ф.В., Троцан А.И. Математическая формулировка задачи теплообмена при внепечной дегазации металла комплексным воздействием вакуума, продувки инертным газом и электростатического поля// Вестник ДонНУ. – 2005. – Вып. 1. – С.251-255.
7. Захаров Н.И., Недопекин Ф.В., Степанникова Е.Л. Математическое моделирование процессов теплопереноса при внепечной дегазации металла с использованием электростатического поля// Математичне моделювання. – 2007. – №1. – С.41-44.
8. Захаров Н.И. Обобщение закона Сиверта// Металлургическая теплотехника. – 2006. – С.353-355.  
\*\* с участием Н.И.Захарова.

Надійшла до редакції 12.03.2008 р.