

Формирование электрических разрядов над свободной поверхностью токонесущей жидкости

© И.Б. Клементьева,¹ М.Э. Пинчук,² И.О. Тепляков¹

¹ Объединенный институт высоких температур РАН,
125412 Москва, Россия

² Институт электрофизики и электроэнергетики РАН,
191186 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: ira.klementyeva@mail.ru

(Поступило в Редакцию 23 апреля 2015 г.)

Работа посвящена исследованию формирования сильноточных электрических разрядов, развивающихся над свободной поверхностью жидкого металла, деформирующейся в результате взаимодействия проходящего через жидкий металл электрического тока с собственным магнитным полем. В статье представлены электрические характеристики разрядов и параметры их зажигания, приведены картины деформации свободной поверхности и формирования электрических разрядов, описаны процессы, происходящие в системе, обсуждается механизм циклического формирования разрядов над поверхностью жидкого металла.

Системы с электрическими разрядами над жидкометаллической поверхностью имеют место во многих технологических процессах электрометаллургии, таких, как электродуговая сварка, переплав, литье, подготовка жидкометаллического теплоносителя, очистка расплава, переработка отходов [1]. Интенсификация перемешивания и тепломассопереноса в таких системах обеспечивается присутствием электровихревых течений, индуцируемых при взаимодействии пропускаемого через проводящую среду электрического тока с собственным магнитным полем. В окрестности контакта дуги с зеркалом расплава создаются условия, задающие распределение плотности тока в объеме и, тем самым, определяющие характер формирующихся электровихревых течений. В этой связи изучение особенностей зажигания электрических разрядов важно [2], особенно применительно к системам с импульсным режимом токоподвода.

Эксперименты проведены на установке по исследованию электровихревых течений [3], базовым элементом которой является тестовая секция, изображенная на рис. 1. Она представляет собой цилиндрическую емкость диаметром 10 см и высотой 5 см (или полусферическую емкость диаметром 18.8 см), заполненную расплавленным металлом, в который погружен стальной стержневой электрод, являющийся анодом, с полусферическим торцом диаметром 20 мм (или медный стержневой электрод диаметром 5 мм) на глубину 5 мм. Емкость с жидким металлом играет роль второго электрода — катода. В экспериментах в качестве рабочей жидкости используются два расплава — свинец и эвтектический сплав индий—галлий—олово с массовым содержанием Ga — 67, In — 20.55, Sn — 12.5% и температурой плавления +10.5°C. Свинец и его эвтектический сплав с литием являются потенциальными теплоносителями в современных реакторах на быстрых нейтронах, в то время как индий—галлий—олово удобен для физического моделирования рассматриваемых систем, так как обладает низкой температурой плавления и относительно низкой токсичностью.

Электрический ток в цепи организуется с помощью аккумуляторного или трехфазного источников питания постоянного тока с напряжением холостого хода U_{xx} до 13 и 20 V соответственно. Электрические параметры, ток в цепи I и напряжение U , измеряемое между стержневым электродом и свободной поверхностью жидкого металла, регистрируются четырехканальным цифровым записывающим осциллографом Tektronix TDS 2014 (или Agilent DSO-X 2024A). Электрический ток определяется по падению напряжения на шунте (0.2 и 0.05 mΩ). Визуализация процессов выполняется высокоскоростной цифровой ПЗС-камерой Citius Imaging C100 со следующей спецификацией: максимальное разрешение матрицы — 1280 × 1024, размер пикселя — 10 μm, максимальная скорость регистрации при разрешении 256 × 128 — 10000 кадров в секунду, время экспозиции — от 4 μs, точность синхронизации — 1 μs. Схема синхронизации обеспечивает требуемую последовательность и временные интервалы между включением электрического тока и срабатыванием записывающего оборудования. По

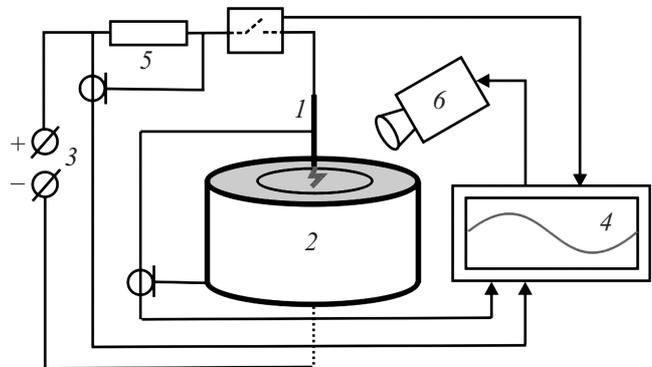


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — стержневой электрод, 2 — цилиндрический или полусферический контейнер, 3 — аккумуляторный или трехфазный источник питания, 4 — осциллограф, 5 — токовый шунт, 6 — высокоскоростной фоторегистратор.

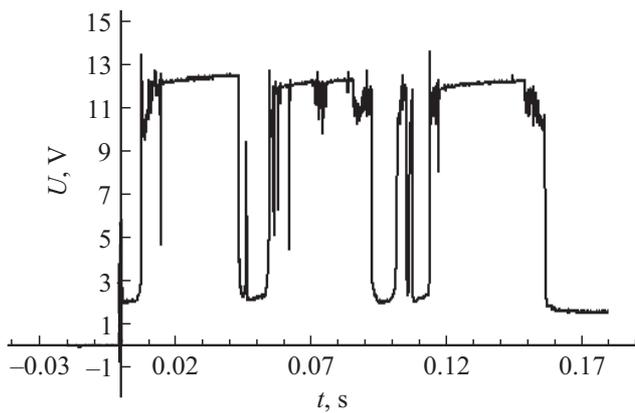


Рис. 2. Осциллограмма напряжения U на контакте стержневого электрода с жидким свинцом.

электрическому току в цепи запускается осциллограф, импульсный сигнал с которого запускает видеокамеру. Осциллограф и скоростная видеокамера записывают процессы до и после включения электрического тока. Эксперименты проводились в воздухе и аргоне при атмосферном давлении.

Явления, имеющие место в рассматриваемой системе, включают процессы деформации свободной поверхности жидкого металла, зажигания дугового разряда и формирования волны на межфазной поверхности. Задача настоящей работы — выявить причины и условия зажигания электрической дуги, что будет являться первым шагом на пути к исследованию ее влияния на особенности гидродинамики и теплообмена, определяющие структуру электровихревых течений.

Расплав металла в рассматриваемых условиях подвергается действию ряда сил, вызывающих движение жидкости под стержневым электродом. Среди них основную роль играют объемная электромагнитная сила и газодинамическая сила со стороны электрической дуги, когда избыточное давление создается потоком плазмы в результате пинч-эффекта и неоднородности поперечного сечения столба. На рис. 2 представлена осциллограмма напряжения U , измеренного между стержневым электродом и жидким металлом, для экспериментов, проведенных с расплавленным свинцом. Развитие процессов в системе происходит следующим образом. На начальном этапе после включения электрического тока разряд не инициируется, и устанавливаются значения величин напряжения на контакте и тока в цепи равные $U \sim 2$ В и $I \sim 500$ А. Затем под действием электродвижущей силы, которая является результатом взаимодействия протекающего через жидкий металл электрического тока с собственным магнитным полем, происходит деформации свободной поверхности, и вокруг погруженного стержневого электрода возникает воронка. Глубина воронки постепенно увеличивается, площадь контакта токопроводящей жидкости с электродом уменьшается, вследствие чего напряжение растет, а ток падает. Резкое увеличение U , достигающего максимального значения

в эксперименте, соответствует уменьшению площади контакта между стержневым электродом и жидким металлом до критических размеров, после чего в результате перегрева и взрыва узкой жидкометаллической перетяжки происходит зажигание электрического разряда. Соответствующие диапазоны осциллограммы на рис. 2 демонстрируют эволюцию дуги следующих параметров: $U_{arc} \sim 10$ В, $I_{arc} \sim 100$ – 200 А. Механизм зажигания электрического разряда в экспериментах схож со способом инициирования дуги посредством контакта и последующего разъединения электродов. При этом для электронной эмиссии с поверхности катода необходима энергия, соответствующая работе выхода из материала. Оценить пробойное напряжение в узком зазоре можно по значению потенциала ионизации для оксида свинца равному 9.7 eV, что ниже величины U_{xx} в наших экспериментах. Быстрое тепловыделение при формировании дуги приводит к росту давления, дальнейшему прогибу жидкой границы под его действием и к увеличению разрядного промежутка. Стационарное состояние системы определяется равенством электромагнитной и газодинамической сил, действующих на жидкий металл, и силы гидростатического давления со стороны расплава. Однако в условиях экспериментов величина катодного падения напряжения, составляющая 7.5 – 10 В для свинцовых электродов, лишь немного меньше напряжения холостого хода, и мощности источника недостаточно для поддержания горения дуги, длина которой растет.

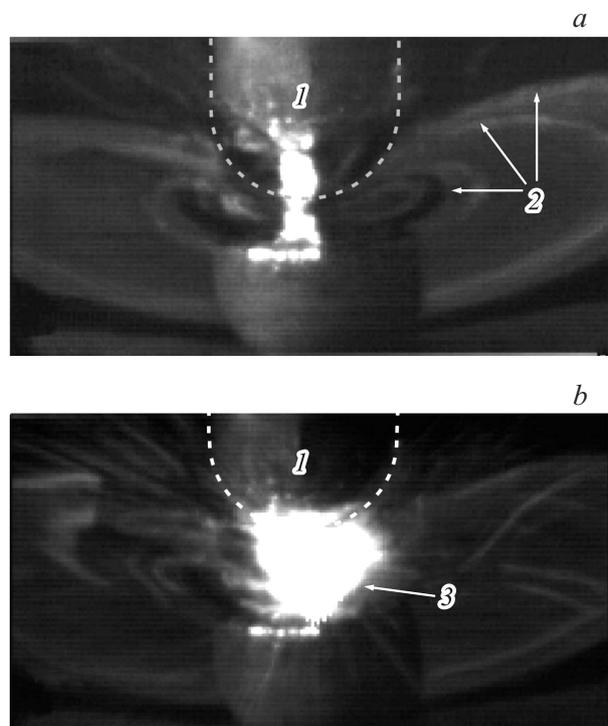


Рис. 3. Фотоснимки, демонстрирующие: а) — прогиб контактной поверхности 2 под стержневым электродом 1 (обозначен пунктирной линией) и б) — зажигание электрического разряда 3 над поверхностью индий-галлий-олова.

Поэтому ток обрывается, условие равновесия сил не достигается, и поверхность расплава возвращается в контакт с электродом. Таким образом эволюция системы носит нестационарный колебательный характер. Деформация свободной поверхности и зажигание разряда повторяются в течение всего пуска, при этом — частота зажигания разряда, обусловленная деформацией свободной поверхности, ~ 30 Hz, время эволюции дуги ~ 7 ms, период пульсаций электрических характеристик разряда, отражающих перемещение привязки дуги к аноду вдоль его поверхности [4], ~ 0.5 ms. Кадры высокоскоростной регистрации подтверждают картину развития процессов, описанную выше.

Результаты экспериментов с расплавленным свинцом и индий–галлий–оловом имеют между собой качественное согласие. Видеокадры на рис. 3, полученные с помощью высокоскоростной съемки, демонстрируют прогиб контактной поверхности (рис. 3, *a*), ее отрыв от стержневого электрода, зажигание электрического разряда (рис. 3, *b*) над эвтектическим сплавом и распространение волны. В экспериментах с индий–галлий–оловом установлено, что в диапазоне токов от 300 до 800 А зависимость глубины прогиба свободной поверхности от отношения силы тока к диаметру стержневого электрода и зависимость критического значения силы тока, при котором зажигается разряд, от радиуса малого электрода в пределах экспериментальной погрешности имеют практически линейный характер.

Полученные в работе результаты будут использованы при изучении и оценке влияния формирования дуги на вихревые структуры и поля скоростей в жидком металле в исследованиях магнитогидродинамического метода интенсификации перемешивания и теплообмена в технических устройствах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-08-31078 и стипендии Президента РФ № СП-1634.2015.1.

Список литературы

- [1] *Rutberg Ph.* Physics and Technology of High-Current Discharges in Dense Gas Media and Flows. NY: Nova Science Publishers Inc. 2009. P. 214.
- [2] *Паперный В.Л., Горбунов С.П., Пухилас К.Н.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 5. С. 17–23.
- [3] *Ивочкин Ю.П., Тепляков И.О., Гусева А.А., Лозина Е.Ю., Клементьева И.Б., Токарев Ю.Н.* // Тепловые процессы в технике. 2012. Т. 4. № 11. С. 487–495.
- [4] *Klementyeva I., Moralev I.* // IEEE Transactions on Plasma Science, Special Issue — Images in Plasma Science. 2011. P. 2144-2145.