



УДК 621.791:004.518

## ОСОБЕННОСТИ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

О. К. НАЗАРЕНКО, О. А. ГУРИН, Э. И. БОЛГОВ

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,  
03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Целью исследований являлась выработка рекомендаций по уменьшению нарушений формирования швов в процессе электронно-лучевой сварки, если из-за вакуумного пробоя в сварочной пушке сработала токовая защита источника ускоряющего напряжения или из-за замыкания цепи управляющий электрод — катод превышено заданное значение тока пучка. Ввиду случайного характера возникновения отмеченных нестационарных процессов в используемый в эксперименте источник ускоряющего напряжения были временно встроены нормально разомкнутый короткозамыкатель цепи управляющий электрод — катод и разрядник с регулируемым межэлектродным расстоянием между жилой к управляющему электроду и землей. Это позволило непосредственно в процессе сварки замыкать любую из цепей, фиксировать осциллограммы тока нагрузки и ускоряющего напряжения, после чего сопоставлять осциллограммы с произошедшим нарушением формирования шва. Установлено, что для уменьшения нарушения формирования шва при пробое в пушке высоковольтный источник питания должен за время около 0,1 мс перейти в режим автоматического повторного включения. Ток порог этого перехода должен в 3...4 раза превышать максимальный ток нагрузки источника с учетом пускового тока при асинхронном включении источника питания, токов зарядки емкостей высоковольтного кабеля и выходного фильтра. При коротком замыкании цепи управляющий электрод — катод источник ускоряющего напряжения должен автоматически перейти в режим стабилизации тока пучка после превышения в течение 3...5 мс его установленного значения на 20...30 %. Библиогр. 3, табл. 1, рис. 4.

*Ключевые слова:* электронно-лучевая сварка, источник ускоряющего напряжения, трехэлектродная эмиссионная система, пробои ускоряющего промежутка, замыкание управляющего электрода с катодом, физическое моделирование, требования к токовой защите

В эмиссионной системе сварочной пушки возможно развитие электрических пробоев вакуумной изоляции между управляющим электродом и анодом. Зазор между управляющим электродом и катодом часто перекрывается каплями расплавленного металла из сварочной ванны. Возможно также нарушение электрической изоляции между жилами высоковольтного кабеля, соединенными с катодом и управляющим электродом. Во всех этих случаях происходит неконтролируемое повышение тока пучка, нарушающее формирование шва.

Резкое отключение источника ускоряющего напряжения при срабатывании максимальной токовой защиты крайне нежелательно, так как вызывает серьезный дефект шва в виде сквозного кратера, незаполненного жидким металлом. Поэтому прежде всего требуется обеспечить минимальное нарушение формирования шва, а затем уже отключать источник ускоряющего напряжения. Если источник был отключен, то в случае его повторного асинхронного включения недопустимо срабатывание токовой защиты из-за пускового тока источника питания, значительно превышающего рабочий ток ввиду броска тока намагничивания силового трансформатора [1], зарядки емкостей высоковольтного кабеля и выходного фильтра. Именно эти токи при автомати-

ческом повторном включении источника, даже в режиме так называемого мягкого, т. е. замедленного пуска, могут вызвать ложное срабатывание токовой защиты, если отсутствует ее временная задержка и установлен слишком низкий порог срабатывания.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию алгоритмов и динамики срабатывания токовой защиты при пробоях и токовой перегрузке в пушке с целью уменьшения нарушений формирования швов.

**Методика исследования.** При исследованиях использовали высоковольтный инверторный источник питания мощностью 6 кВт с ускоряющим

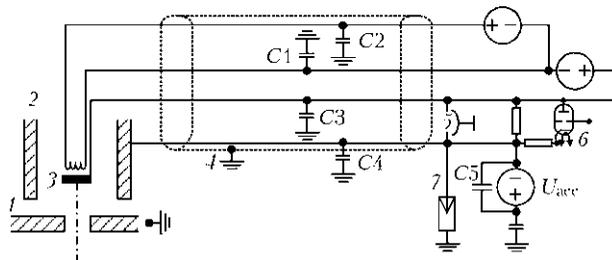


Рис. 1. Схема экспериментальной аппаратуры: 1 — анод; 2 — управляющий электрод; 3 — катод; 4 — высоковольтный кабель; 5 — короткозамыкатель цепи управляющий электрод — катод; 6 — регулятор тока пучка; 7 — разрядник с регулируемым межэлектродным расстоянием ( $U_{acc}$  — источник ускоряющего напряжения;  $C1...C4$  — распределенные емкости жил кабеля относительно земли;  $C5$  — емкость фильтра)



напряжением 60 кВ, созданный в результате совместной работы коллективов Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины и ООО «Торсион» (г. Харьков). При токах нагрузки до 0,1 А источник работает в режиме стабилизации ускоряющего напряжения. Благодаря наличию в цепи нагрузки токового датчика при коротких замыканиях возможен переход стабилизатора напряжения в режим стабилизации тока, что ограничивает ток нагрузки. На выходе высоковольтного фильтра включен балластный резистор, ограничивающий максимальную амплитуду тока через выходной высоковольтный выпрямитель при коротком замыкании в нагрузке и предотвращающий возникновение паразитных резонансных процессов в выходном кабеле [2].

Из-за случайного характера возникновения вакуумного пробоя сложно зафиксировать его электрические и временные параметры для сопоставления их с нарушениями формирования шва. Поэтому в высоковольтный источник питания временно были встроены нормально разомкнутый короткозамыкатель цепи управляющий электрод — катод и разрядник с регулируемым межэлектродным расстоянием между жилой к управляющему электроду и землей (рис. 1). Это позволяет непосредственно в процессе сварки образца в выбранное время замыкать любую из цепей, фиксировать осциллограммы тока нагрузки и ускоряющего напряжения, сопоставляя их с произошедшим нарушением формирования шва. В качестве регистратора использовали цифровой электронный осциллограф Tektronix TDS-2014 с полосой пропускания 100 МГц и частотой выборки 1 Гвыб/с.

**Результаты и их обсуждение.** При экспериментальных исследованиях выявлена необходимость различных подходов к алгоритмам работы токовой защиты источника питания с целью возможности выполнения электронно-лучевой сварки при имитации пробоев в пушке и при коротком

замыкании цепи управляющий электрод — катод (диодный режим работы пушки).

На рис. 2 приведены осциллограммы тока пучка и ускоряющего напряжения при имитации электрического пробоя между управляющим электродом и анодом пушки непосредственно в процессе сварки. Источник ускоряющего напряжения принудительно переводится в режим автоматического повторного включения с целью предотвращения серьезного нарушения формирования сварного шва и выхода источника из строя [3]. Длительность фронтов отключения ускоряющего напряжения и соответствующего броска тока нагрузки составляет около 0,1 мс. Ускоряющее напряжение отсутствует в течение 7,5 мс, что позволяет восстановить электрическую прочность вакуумного промежутка эмиссионной системы пушки. Затем ускоряющее напряжение достаточно медленно — за 2,5 мс — восстанавливается по линейному закону.

Восстановление ускоряющего напряжения может быть выполнено значительно быстрее, но тогда из-за соответствующего увеличения скорости нарастания тока пучка возможны выплески металла из сварочной ванны. Кроме того, мягкий пуск ускоряющего напряжения уменьшает пусковой ток источника, а также замедляет зарядку емкостей фильтра и высоковольтного кабеля, благодаря чему возможно некоторое уменьшение требований к максимальному току источника питания. Тем не менее, как следует из рис. 2, значение броска тока нагрузки в момент повторного включения ускоряющего напряжения достигает 0,35 А, т. е. превышает максимальный рабочий ток источника (0,1 А), по крайней мере, в 3...4 раза. Естественно, если уменьшить порог превышения допустимого тока, то даже если электрическая прочность вакуумного промежутка уже восстановилась, будут неограниченное время происходить ложные срабатывания защиты источника и процесс сварки не сможет восстановиться. Отметим, что в отсутствие ускоряющего напряжения на осциллограмме фиксируется протекание некоторого нагрузочного тока, по всей вероятности, между катодом, находящимся под остаточным отрицательным потенциалом, и управляющим электродом. При нарастании ускоряющего напряжения происходит возрастание переходного тока, на значение которого влияет цепь стабилизации тока пучка. Если отсутствуют серьезные неисправности аппаратуры, то общая длительность восстановления нормальной работы оборудования не превышает долей секунды и требуется, в худшем случае, ремонтный сварочный проход по участку нарушения формирования шва.

В рассматриваемом случае перевод источника ускоряющего напряжения в режим автоматического повторного включения значительно эффек-

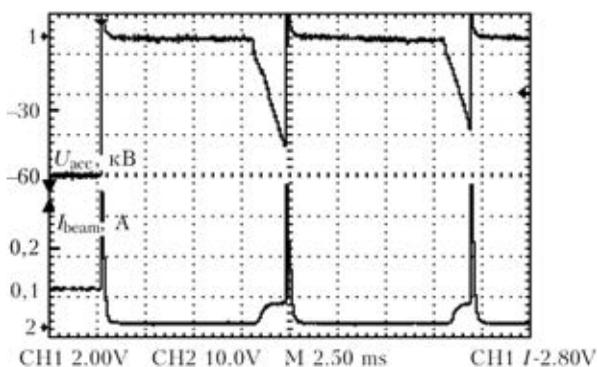


Рис. 2. Динамика изменения тока пучка  $I_{beam}$  и ускоряющего напряжения  $U_{acc}$  при имитации электрического пробоя в пушке вакуумного промежутка управляющий электрод — катод непосредственно в процессе электронно-лучевой сварки

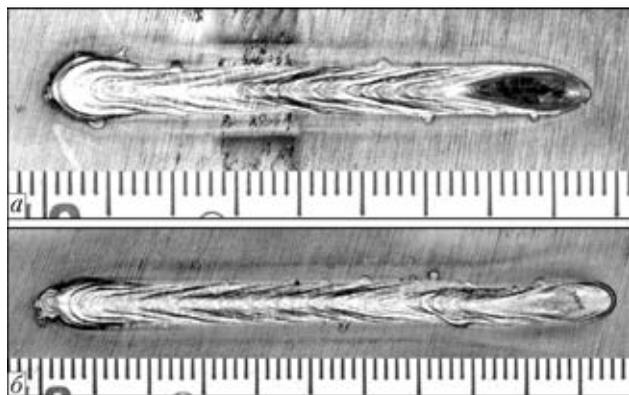


Рис. 3. Внешний вид швов, прерванных в момент замыкания цепи управляющий электрод — катод: *a* — образование дефекта в виде кратера при отключении ускоряющего напряжения максимальной токовой защитой; *б* — бездефектное окончание шва благодаря переходу источника из режима стабилизации ускоряющего напряжения в режим стабилизации тока пучка

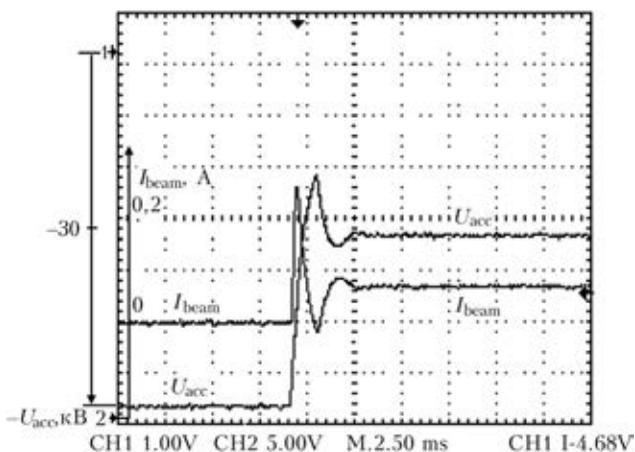


Рис. 4. Динамика изменения тока пучка  $I_{beam}$  и ускоряющего напряжения  $U_{acc}$  при имитации короткого замыкания управляющего электрода с катодом непосредственно в процессе электронно-лучевой сварки

**Характеристика токовой защиты источника питания для электронно-лучевой сварки**

Нарушение режима сварки	Причина нарушения	Алгоритм работы токовой защиты	Время срабатывания, мс
Ток пучка в 3...4 раза превысил максимальный ток нагрузки источника	Электрический пробой между управляющим электродом и анодом	Принудительное переключение источника ускоряющего напряжения в режим автоматического повторного включения	~0,1
Ток пучка достиг значения, соответствующего диодному режиму эмиссионной системы пушки	Короткое замыкание цепи управляющий электрод — катод	Принудительное переключение источника из режима стабилизации напряжения в режим стабилизации тока	2...5

тивнее принудительного переключения источника ускоряющего напряжения в режим источника тока, поскольку из-за протекания тока поддерживаются ионизационные процессы в вакуумной промежутке, препятствующие восстановлению его электрической прочности.

Наоборот, как будет показано ниже, при переходе эмиссионной системы в диодный режим из-за короткого замыкания цепи управляющий электрод–катод оказывается полезным принудительное переключение источника ускоряющего напряжения в режим источника тока. При замыкании этой цепи ток возрастает до уровня, соответствующего полностью отпертой эмиссионной системе. Отключение в этот момент ускоряющего напряжения приводит к образованию дефекта в виде незаполненного жидким металлом глубокого кратера с многочисленными усадочными трещинами (рис. 3, *a*).

Перевод источника ускоряющего напряжения в режим источника тока с соответствующим снижением ускоряющего напряжения позволяет избежать образования этого дефекта (рис. 3, *б*).

На рис. 4 приведены осциллограммы тока пучка и ускоряющего напряжения при имитации электрического пробоя между управляющим электродом и катодом пушки. В момент замыкания управляющего электрода с катодом, когда эмис-

сионная система переходит в диодный режим, ток пучка возрастает от установленного значения 0,1 до 0,25 А. По истечении 3...5 мс срабатывает токовая защита, программный порог которой равен 0,13 А, т. е. на 30 % превышает уровень тока пучка, и источник напряжения переходит в режим стабилизации этого значения. Для поддержания такого тока источник генерирует напряжение около 30 кВ. Таким образом, мощность пучка снижается от 6 до 3,9 кВт, и, главное, при снижении ускоряющего напряжения пучок значительно перифокусируется (фокусное пятно поднимается относительно поверхности изделия), в результате чего объем расплавленного металла существенно сокращается. Происходит бездефектное окончание формирования шва без фиксации кратера, после чего источник может быть выключен для выполнения необходимых восстановительных работ.

В таблице приведены оптимальные характеристики токовой защиты источника ускоряющего напряжения.

**Выводы**

1. При пробое в эмиссионной системе сварочной пушки высоковольтный источник питания должен за время около 0,1 мс перейти в режим автоматического повторного включения. Токвый порог этого перехода должен в 3...4 раза превышать



максимальный ток нагрузки источника с учетом пускового тока при асинхронном включении источника питания, токов зарядки емкостей высоковольтного кабеля и выходного фильтра.

2. При коротком замыкании цепи управляющий электрод — катод источника ускоряющего напряжения должен автоматически перейти в режим стабилизации тока пучка после превышения

на 20...30 % его установленного значения в течение 3...5 мс.

1. *Шабод М. А.* Максимальная токовая защита. — Л.: Энергоатомиздат, 1991. — 96 с.
2. *Назаренко О. К., Матвейчук В. А.* Ограничение перенапряжений в высоковольтных цепях после разрядов в сварочной пушке // Автомат. сварка. — 2011. — № 10. — С. 40–43.
3. *Pat. 3042652 DE.* Method and apparatus for electron beam welding / V. K. Lebedev, O. K. Nazarenko, V. E. Lokshin et al. — Publ. 02.04.1982.

Поступила в редакцию 15.10.2012

## ЦІЛЬОВА КОМПЛЕКСНА ПРОГРАМА НАН УКРАЇНИ «ПРОБЛЕМИ РЕСУРСУ І БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ, СПОРУД ТА МАШИН»

*Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2010–2012 рр.  
Науковий керівник — академік Б. Є. Патон*

До збірника ввійшли статті, які підготовлені за результатами цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин», отриманими впродовж 2010–2012 рр., до реалізації якої було залучено 26 інститутів НАН України. Мета програми — розробка методологічних основ прогнозування залишкового ресурсу конструкцій, створення методів, технічних засобів і технологій для оцінки технічного стану та подовження термінів експлуатації техногенно та екологічно небезпечних об'єктів. Для наукових співробітників, інженерів, студентів старших курсів, зайнятих розробкою та експлуатацією конструкцій, споруд та машин.

**Розділ 1.** Розробка методологічних основ оцінки технічного стану та обґрунтування безпечного терміну експлуатації конструктивних елементів об'єктів підвищеної небезпеки на території України.

**Розділ 2.** Розробка методів і нових технічних засобів неруйнівного контролю та діагностики стану матеріалів і виробів тривалої експлуатації.

**Розділ 3.** Розробка методів захисту від корозії елементів конструкцій об'єктів тривалої експлуатації.

**Раздел 4.** Разработка эффективных методов оценки и продления ресурса объектов атомной энергетики.

**Розділ 5.** Підвищення надійності та подовження ресурсу енергетичного обладнання і систем.

**Розділ 6.** Створення систем моніторингу технічного стану трубопроводів і об'єктів газо- та нафтопереробної промисловості.

**Розділ 7.** Підвищення надійності та подовження ресурсу мостів, будівельних, промислових і транспортних конструкцій.

**Розділ 8.** Розробка технологій ремонту та відновлення елементів конструкцій об'єктів підвищеної небезпеки з метою продовження терміну їх експлуатації.

**Розділ 9.** Підготовка нормативних документів і науково-технічних посібників з питань оцінки ресурсу об'єктів тривалої експлуатації.

Проблеми ресурсу  
і безпеки експлуатації  
конструкцій, споруд  
та машин

