



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЦЕПЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ТОКОМ СВАРОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Чл.-кор. НАН Украины **О. К. НАЗАРЕНКО**, **В. С. ЛАНБИН**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены с использованием компьютерной математической симуляции высоковольтные цепи управления током пучка электронов сварочных пушек. Показано, что в случае применения автономного источника управляющего напряжения искровой пробой в эмиссионной системе сопровождается длительным (около 10 мс) полным открыванием эмиссионной системы, что ведет к скачку тока, нарушающему формирование сварного шва. При управлении током пучка с помощью автоматического смещения такие опасные скачки тока после искровых пробоев исключаются.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, управление, ток пучка, высоковольтные цепи, эмиссионная система, искровой пробой, переходные процессы, дефекты, формирование швов

Основным способом управления током пучка электронов является изменение потенциала управляющего электрода эмиссионной системы сварочной пушки. При этом наиболее распространены две схемы формирования управляющего напряжения:

с использованием автономного источника напряжения (причем минус источника ускоряющего напряжения подключен к катоду эмиссионной системы);

с применением автоматического смещения [1] (в цепь катода эмиссионной системы включена электронная лампа с сеточным управлением [2], а минус источника ускоряющего напряжения соединен с управляющим электродом эмиссионной системы).

В стационарном режиме работы эмиссионной системы управление током пучка электронов осуществляется одинаково успешно при использовании любой из указанных схем. Однако в практике применения автономного источника напряжения приходится сталкиваться со значительными нарушениями формирования швов на тонколистовых материалах, возникающими после искровых пробоев эмиссионной системы, которые сопровождаются разрядом емкостей высоковольтных цепей за доли микросекунды [3]. При этом процесс сварки не прерывается, поскольку защита не отключает источник, но в шве образуется кратер (рис. 1) или может произойти прожог изделия. Как показали исследования, значение энергии пучка, необходимой для образования такого дефекта, составляет приблизительно 300 Дж. Поэтому образование дефекта не может быть объяснено только высвобождением запасенной энергии источника питания, поскольку ее значение сос-

тавляет менее 10 Дж [3]. Вероятность нарушения процесса сварки увеличивается при использовании сварочных пушек, перемещаемых внутри крупногабаритных вакуумных камер, когда длина высоковольтного кабеля достигает 50 м, а его собственная емкость — $1 \cdot 10^{-8}$ Ф. Степень дефектности швов тем выше, чем больше мощность используемого энергоблока сварочная пушка-источник питания. В то же время при сварке металлов большой толщины такое нарушение практически не влияет на формирование шва. Затронутые выше вопросы ранее не обсуждались в технической литературе, что обусловило проведение ряда исследований, результаты которых освещены ниже. В настоящей работе не рассматриваются переходные процессы, которые связаны с возникновением дуговых разрядов в эмиссионной системе, поскольку в современном источнике ускоряющего напряжения эффективно предотвращается переход искровых разрядов в дуговые [4].

Упрощенные схемы двух высоковольтных цепей управления током пучка — с автономным источником управляющего напряжения (рис. 2, а) и автоматическим смещением (рис. 2, б) — позволяют рассмотреть происходящие в них переходные процессы после искрового пробоя эмиссионной системы.

Практически всегда искровой пробой вакуумной изоляции происходит в ускоряющем промежутке анод-управляющий электрод, при этом пробойный ток поддерживается за счет разряда рас-

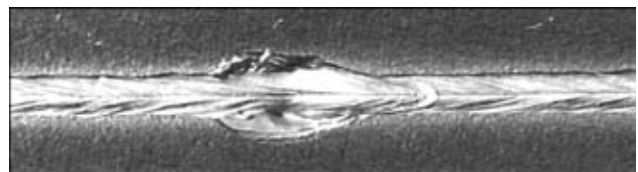


Рис. 1. Внешний вид металла шва с дефектом в виде кратера, обусловленного кратковременным импульсом тока пучка электронов с энергией приблизительно 300 Дж

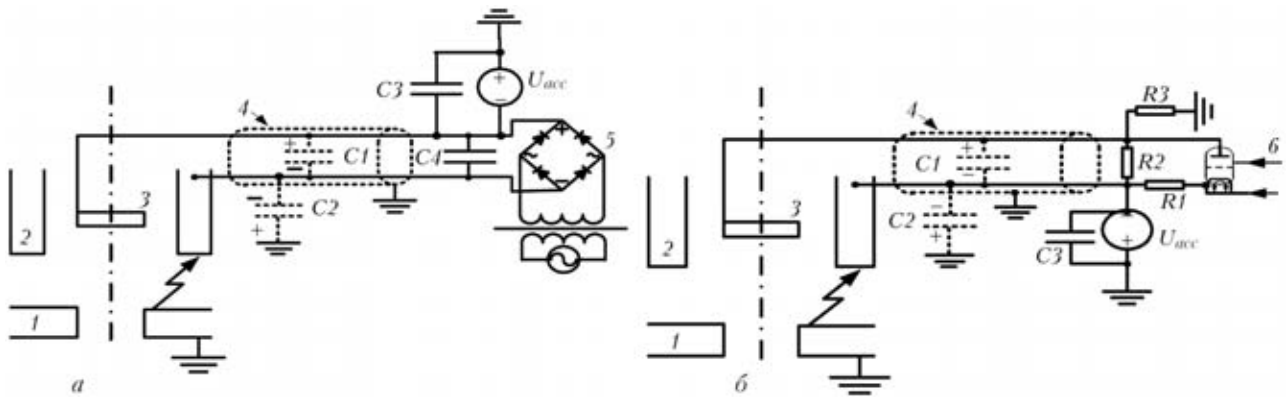


Рис. 2. Упрощенные схемы управления током пучка электронов с использованием автономного источника управляющего напряжения (а) и автоматического смещения (б): 1 — анод; 2 — управляющий электрод; 3 — катод; 4 — высоковольтный кабель; 5 — источник управляющего напряжения; 6 — управляющая лампа; R1 — резистор обратной связи в цепи стабилизации тока пучка; R2, R3 — сопротивление плеч высоковольтного делителя напряжения; стрелками указано основное место искрового пробоя ускоряющего промежутка; остальные обозначения см. в тексте

пределенной емкости кабеля C2 и суммарной емкости фильтра C3, а также распределенных емкостей источника ускоряющего напряжения U_{acc} . Во время искрового пробоя эмиссионной системы управляющий электрод оказывается практически накоротко соединенным с землей. Важно отметить, что в случае использования источника управляющего напряжения (рис. 2, а) разряд емкости C3 произойдет через распределенную емкость C1 кабеля и емкость фильтра C4 источника управляющего напряжения $U_{упр}$. При работе с автоматическим смещением (рис. 2, б) ток разряда емкости C3 не проходит по цепям формирования управляющего напряжения, при этом условия их работы улучшаются. После разряда емкостей искровой разряд прекращается, что позволяет восстановиться вакуумной изоляции и зарядиться емкостям высоковольтных цепей за время, зависящее от внутреннего сопротивления источников, самих емкостей и параметров токоведущих цепей.

Остается неизвестным, как изменяются во время пробоя и после него разность потенциалов управляющий электрод–катод и ток пучка.

Осуществить непосредственно с помощью электронных устройств запись быстротекущих переходных процессов при искровом пробое эмиссионной системы весьма затруднительно, поскольку исследуемые цепи погружены в трансформаторное масло и находятся под высоким потенциалом. Кроме того, на сами измерительные цепи при пробоях воздействуют мощные электромагнитные помехи, существенно искажающие картину регистрируемых процессов. Поэтому нами применено компьютерное моделирование высоковольтных цепей управления сварочным током с использованием одной из известных программ OrCAD PCB Designer with Pspice (фирма «Cadence Design Systems»).

При моделировании схем полагаем, что в обоих случаях применены одинаковые высоковольтные

кабели, эмиссионные системы, а также источники ускоряющего напряжения 60 кВ мощностью 30 кВт с внутренним сопротивлением 5 кОм. Модуляционные характеристики эмиссионных систем приведены на рис. 3, по ним можно задать значения управляющего напряжения и внутреннего сопротивления эмиссионной системы, соответствующие выбранному значению стационарного тока пучка. Высоковольтный кабель длиной 50 м имеет три токоведущих провода для питания катода и его подогревателя (спирали). Провода окружены оплеткой, которая соединена с управляющим электродом пушки. Распределенная емкость между проводами составляет 50 пФ/п.м, а между оплеткой и внешним заземленным экраном — 150 пФ/п.м. Распределенная индуктивность оплетки и каждого из проводов равна 1,5 мкГн/п.м, внутреннее сопротивление источника управляющего напряжения — 30 кОм.

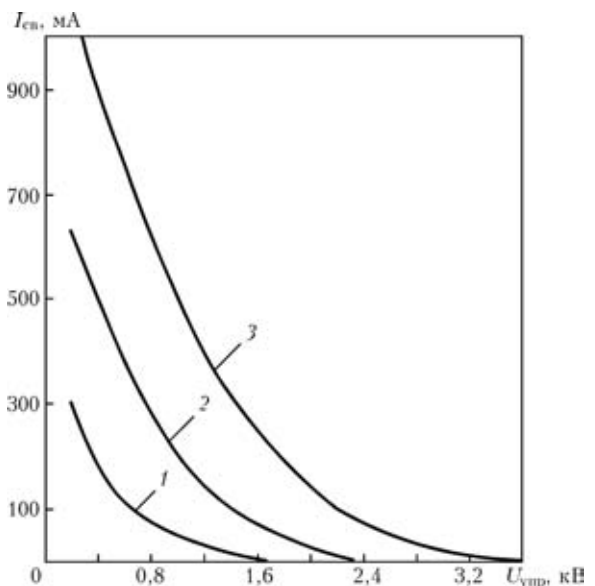


Рис. 3. Модуляционные характеристики эмиссионных систем мощностью 15 (1), 30 (2) и 60 кВт (3) при $U_{acc} = 60$ кВ

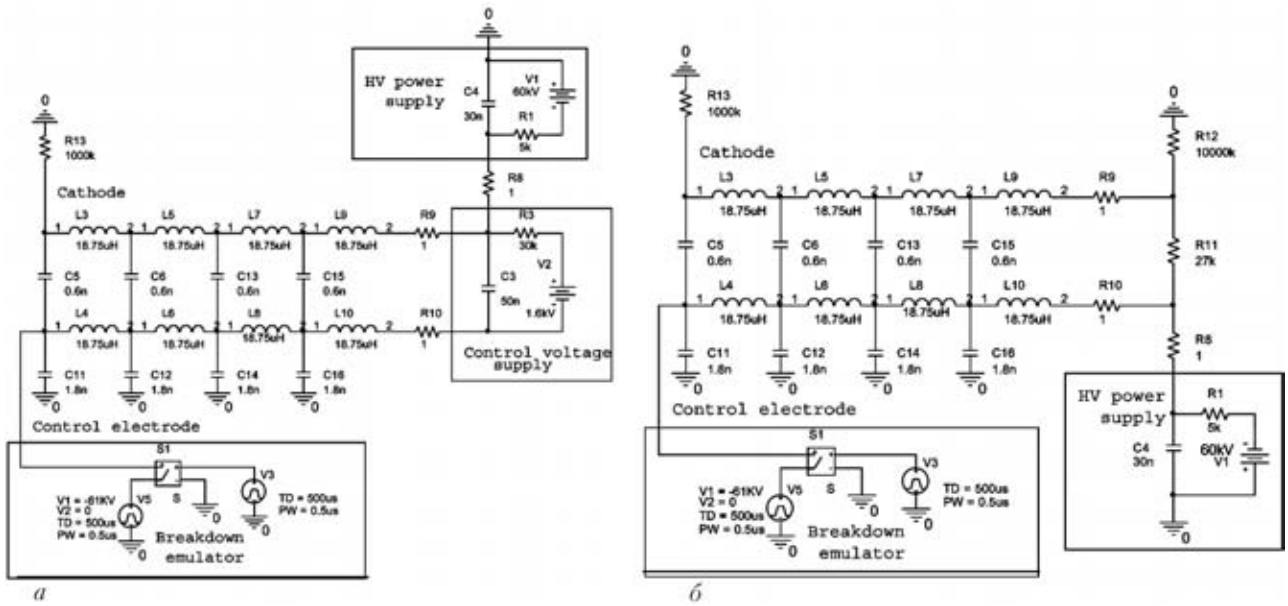


Рис. 4. Графические окна компьютерного математического симулятора для анализа высоковольтных цепей управления током пучка 60 мА с автономным источником (а) и автоматическим смещением (б)

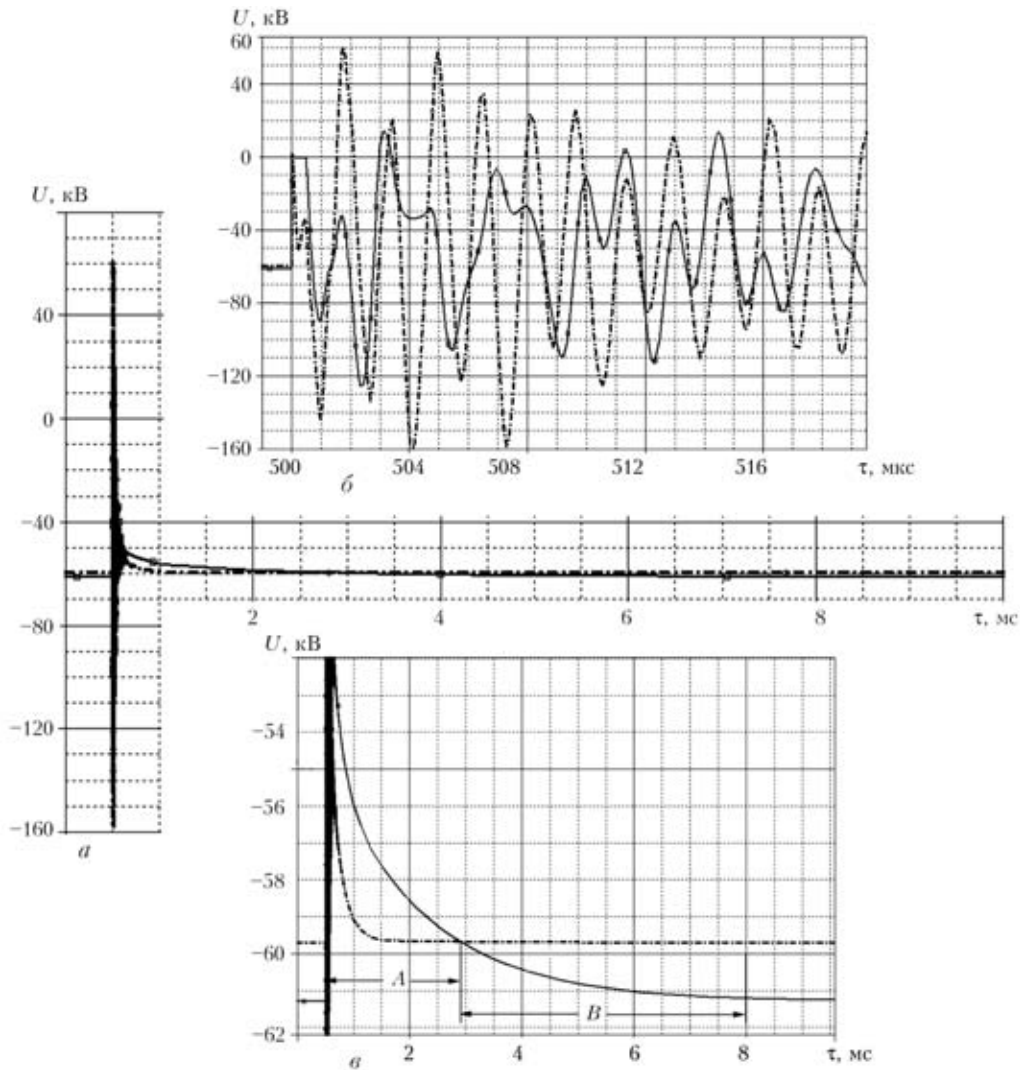


Рис. 5. Изменение потенциалов U управляющего электрода (сплошные кривые) и катода (штрихпунктирные) после пробоя эмиссионной системы с автономным источником управляющего напряжения: а — общая картина; б, в — растянутые шкалы соответственно времени и потенциала

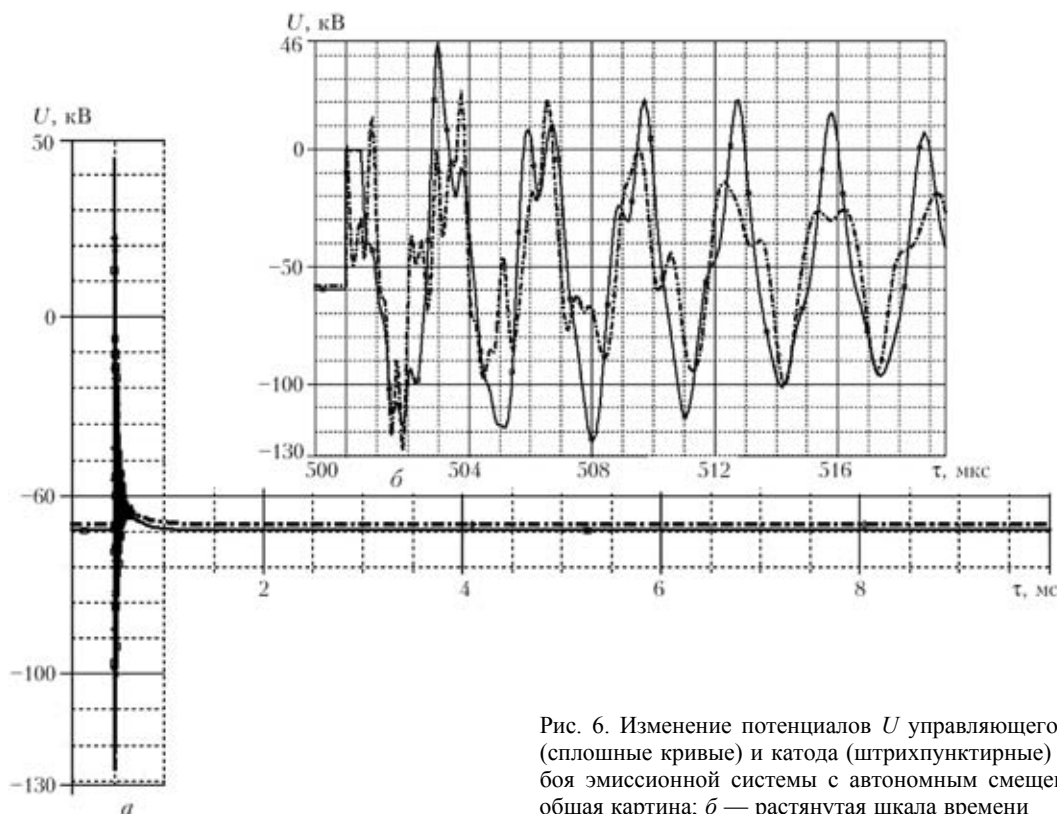


Рис. 6. Изменение потенциалов U управляющего электрода (сплошные кривые) и катода (штрихпунктирные) после пробоя эмиссионной системы с автономным смещением: a — общая картина; b — растянутая шкала времени

На рис. 4 показаны графические окна компьютерного математического симулятора высоковольтных цепей управления током пучка с автономным источником управляющего напряжения (рис. 4, a) и автоматическим смещением (рис. 4, b) при исходном стационарном токе пучка 60 мА и других заданных выше параметрах.

Электронная проводимость сварочной пушки, соответствующая току 60 мА, эмулируется резистором с сопротивлением 1 МОм, подключенным в цепь между землей и токоподводом к катоду. Токоподвод к управляющему электроду соединен с эмулятором контактора, замыкающим на 0,5 мкс управляющий электрод на землю с задержкой 100 мкс после начала процесса эмуляции. Представление высоковольтного кабеля в виде одной пары сосредоточенных элементов — емкости и индуктивности — не выявило в полной мере резонирующий характер цепи. Поэтому кабель рассматривается как длинная линия и моделируется четырьмя звеньями, причем дальнейшее увеличение количества звеньев не меняет характера переходных процессов, которые обнаруживаются путем эмуляции.

На рис. 5 приведены временные изменения потенциалов управляющего электрода и катода после искрового пробоя эмиссионной системы с автономным источником управляющего напряжения. Видно, что перед пробоем эмиссионная система формирует пучок электронов с током 60 мА, а управляющее напряжение составляет 1,6 кВ (рис. 5, e). После пробоя потенциалы как управ-

ляющего электрода, так и катода становятся равными потенциалу земли (рис. 5, b), после чего потенциал катода сразу, а потенциал управляющего электрода с задержкой на время существования короткого замыкания (0,5 мкс) в результате затухающих автоколебаний начинают изменяться с частотой около 1 МГц и амплитудой +60...-160 кВ. Автоколебания прекращаются примерно через 10 мкс; общее время восстановления стационарного состояния цепи составляет около 10 мс. В течение этого времени управляющий электрод находится 3 мс под положительным потенциалом по отношению к катоду (участок A на рис. 5, e), т. е. эмиссионная система работает в режиме полного отбора тока катода. В это время на изделии может выделиться энергия пучка до 200 Дж. С момента уравнивания потенциалов управляющего электрода и катода и до установления исходной стационарной разности потенциалов — 1,6 кВ (участок B на рис. 5, e) дополнительно выделяется энергия пучка не менее 100 Дж. Всего за период восстановления стационарного состояния высоковольтной цепи на изделии выделится энергия до 300 Дж, чем и объясняется образование в шве в виде кратера (см. рис. 1).

При пробое вакуумного промежутка эмиссионной системы, работающей в режиме автоматического смещения, характер переходных процессов существенно отличается от рассмотренного выше (рис. 6):

потенциал управляющего электрода остается отрицательным по отношению к потенциалу ка-



тогда, что исключает повреждение изделия избыточным током;

время восстановления стационарного состояния высоковольтной цепи составляет всего 1 мс, т. е. на порядок ниже;

амплитуда перенапряжений меньше почти на 25 %, что несколько снижает риск повреждения элементов высоковольтных цепей.

Выводы

1. В случае применения автономного источника управляющего напряжения искровой пробой эмиссионной системы сварочной пушки сопровождается длительным (около 10 мс) открыванием эмиссионной системы, причем в течение 3 мс управляющий электрод находится под положительным потенциалом по отношению к катоду и эмиссионная система работает в режиме полного отбора тока катода. Как следствие, уже после завершения пробоя на изделие может воздействовать пучок электронов, значение мощности которого существенно выше заданной, что приводит к нарушению формирования шва.

2. При управлении током пучка с помощью автоматического смещения потенциал управляющего электрода остается отрицательным по от-

High-voltage circuits for control of the welding gun beam current were studied using mathematical computer simulation. It is shown that in the case of using an independent control voltage source the spark breakdown in the emission system is accompanied by a long (about 10 ms) full opening of the emission system, this leading to a surge of current violating the weld formation. Control of the beam current using an automatic offset eliminates such dangerous current surges after spark breakdowns.

ношению к потенциалу катода, что исключает повреждение изделия избыточным током. Время восстановления стационарного состояния высоковольтной цепи составляет только 1 мс, т. е. на порядок меньше, чем в случае применения автономного источника управляющего напряжения.

3. Результаты компьютерного моделирования высоковольтных цепей управления сварочным током хорошо согласуются с опытом их практического использования и убедительно свидетельствуют в пользу управления током пучка с помощью автоматического смещения.

Авторы считают своим долгом выразить признательность В. Е. Локишину и В. В. Галушке за конструктивное участие в дискуссии по обсуждаемой выше теме.

1. Бонч-Бруевич А. М. Применение электронных ламп в экспериментальной физике. — М.: Гостехтеориздат, 1955. — 654 с.
2. Pat. 24 60 424 Deutsche, H 01 J 37/24. Strahlstromsteuerung für eine Elektronenstrahl-Schweissmaschine / R. Mayer. — Publ. 17.03.77.
3. Раховский В. И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. — М.: Наука, 1970. — 320 с.
4. Назаренко О.К., Локишин В. Е. Динамические характеристики высоковольтных источников питания для электронно-лучевой сварки // Автомат. сварка. — 2005. — № 1. — С. 36–38.

Поступила в редакцию 30.12.2005

СИ «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Сигнальная информация (СИ) «Сварка и родственные технологии» содержит оперативную информацию на языке оригинала и в русском переводе оглавлений научно-технических журналов, монографий, сборников, трудов конференций, названий переводов статей, перечней документов Международного института сварки и других отечественных и зарубежных информационных материалов из более чем 100 периодических изданий 52 стран мира.

Сигнальная информация (СИ) «Сварка и родственные технологии» издается научно-технической библиотекой Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины с 1995 г. Периодичность 6 номеров в год. С 2005 г. СИ выпускается и рассылается в электронном варианте.

Сигнальная информация «Сварка и родственные технологии» предназначена для научных работников и инженеров, профессорско-преподавательского состава, аспирантов и специалистов сварочного производства.

Местом хранения оригиналов всех изданий, представленных в выпусках СИ, является научно-техническая библиотека Института электросварки. С материалами можно ознакомиться в читальном зале библиотеки или заказать ксерокопии отдельных статей, переводов, документов и т. п. Для заказа определенного документа достаточно указать только регистрационный номер материала, который находится в конце каждого описания. Например: СИ. 06.01.10.

По вопросам подписки и условиям выполнения заказов обращаться по адресу:
03680, ГСП, Киев-150, ул. Боженко, 11. Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Научно-техническая библиотека.
Факс: (044) 5280486; справки по телефону: 287-07-77.
E-mail: library@paton.kiev.ua