

моделирование ККМ без учета высокочастотных пульсаций по сравнению с методами, основанными на использовании существующих стандартных программ, ускоряет работу моделей. Построенная таким образом структурная Simulink-модель позволяет рассчитать процессы в ККМ с учетом основных нелинейностей, сравнить полученные данные с результатами точных расчетов и сравнительно просто определить гармонический состав тока питающей сети.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А.Г., Белов Г.А., Сергеев А.Г. Системы управления полупроводниковыми преобразователями. — Чебоксары: Изд-во ЧувГУ, 2010.
2. Белов Г.А., Серебрянников А.В. Искажения входного тока корректора коэффициента мощности с двухконтурной системой управления. — Электричество, 2010, № 8.
3. Белов Г.А., Павлова А.А., Серебрянников А.В. Сравнение однофазного и двухфазного корректоров коэффициента мощности с отпиранием силовых транзисторов при нуле токов дросселей. — Силовая электроника, 2009, № 3.
4. UC1852/UC2852/UC3852. High Power-Factor Preregulator. Texas Instruments. Data Sheet № 10/94: <http://www.ti.com/>
5. Andreycak B. Power factor correction using the UC3852 controlled on-time zero current switching technique. — Product and Applications (Handbook 1995/96/Integrated Circuits Unirode U-132).
6. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. — М.: Наука, 1978.
7. Белов Г.А., Серебрянников А.В. Анализ процессов в корректоре коэффициента мощности с отпиранием силового транзистора при нулевом значении тока дросселя. — Нелинейный мир, 2011, т. 9, № 9.
8. Белов Г.А., Малинин Г.В., Серебрянников А.В. Моделирование корректоров коэффициента мощности на основе метода усреднения. — Нелинейный мир, 2009, № 9, т. 7.

[22.09.11]

*Авторы: Белов Геннадий Александрович окончил факультет электронной техники Московского энергетического института (МЭИ) в 1961 г. Докторскую диссертацию «Развитие теории и разработка импульсных полупроводниковых преобразователей постоянного напряжения» защитил в МЭИ в 1991 г. Заведующий кафедрой промышленной электроники Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова (ЧувГУ).*

*Серебрянников Александр Владимирович окончил факультет радиотехники и электроники ЧувГУ в 2005 г. Кандидатскую диссертацию «Анализ и расчет корректоров коэффициента мощности на базе современных микросхем управления» защитил в ЧувГУ в 2010 г. Научный сотрудник научно-исследовательской части ЧувГУ.*

\* \* \*

## Энергетические и технологические процессы импульсного регулирования тока электронного пучка в установках прецизионной сварки

ЩЕРБАКОВ А.В.

*Рассмотрены особенности совместной работы источников электропитания установки для прецизионной электронно-лучевой сварки в режиме модуляции тока электронного пучка. Предложена методика синтеза системы модуляции тока пучка, которая может быть использована при настройке стабилизаторов современных систем электропитания. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния формы импульса тока пучка на формирование сварочной ванны.*

**Ключевые слова:** электронно-лучевая сварка, импульсная сварка, электронная пушка, модуляция тока электронного пучка, сварочная ванна

Современные электронно-лучевые технологические комплексы мощностью как до 100 кВт, так и более позволяют осуществлять за один проход сварку изделий толщиной до 200 мм при отношении глубины шва к ширине более 10. Сварка изделий большой толщины стала по сути одним из

*Specific features relating to joint operation of sources supplying power to the installation for precision electron-beam welding in the mode of modulating the electron beam current are considered. A procedure for synthesizing the beam current modulation system that can be used in tuning the stabilizers of modern electric power supply systems is proposed. Results from experimental investigations for studying how the beam impulse current waveform influences the welding bath formation are presented.*

**Key words:** electron beam welding, impulse welding, electron gun, modulation of electron beam current, welding bath

главных приложений электронно-лучевой технологии.

В то же время отмечается и тенденция по внедрению электронно-лучевой техники для сварки изделий с толщиной менее 1 мм или прецизионной сварки. Во-первых, это связано с постоянным по-

вышением уровня технологических требований к сварным соединениям — минимизация размеров зон термического влияния, деформаций, структурных превращений, и повышение чистоты металла шва, что может быть обеспечено только применением электронного пучка в вакууме. Вторая причина заключается в снижении стоимости производства, массы и габаритов элементов технологического оборудования. Естественно, что многие технические решения, реализованные на первых (маломощных) образцах электронно-лучевых установок, сегодня вновь становятся актуальными. Например, известно, что ведение сварки в импульсном режиме по сравнению со сваркой на постоянном токе, при одном и том же значении удельной энергии, обеспечивает увеличение глубины сварного шва и уменьшение размеров зоны термического влияния [1]. Вместе с тем переход на современную элементную базу источников электропитания и систем управления обуславливает необходимость изменения существовавших ранее технических решений. Для решения данной задачи необходим анализ процессов, протекающих при взаимодействии электронного пучка с материалом изделия, а также в источниках питания и электронной пушке при импульсном регулировании мощности электронного пучка.

**Процессы в источниках электропитания и в электронной пушке при модуляции тока пучка.** Система «источник питания — электронная пушка» обеспечивает формирование пучка электронов с заданными энергетическими и пространственными характеристиками. Для процессов сварки, резки и термообработки различных материалов в основном используются так называемые двухлинзовые электронные пушки (рис. 1). Первая линза пушки  $L1$  является электростатической и обеспечивает ускорение электронов до энергии в диапазоне 20–100 кэВ с их первичной фокусировки, а вторая, магнитная линза  $L2$ , предназначена для проецирования наименьшего сечения электронного пучка, формируемого первой линзой, на изделие  $И$ . Электростатический генератор электронного пучка  $ЭГ$ , включающий в себя первую линзу пушки, строится по трехэлектродной схеме и содержит катод  $К$ , управляющий электрод  $УЭ$  и анод  $А$ . Электроны, эмитируемые нагретым катодом, фокусируются полем управляющего электрода и ускоряют полем анода. Такая система в электронной оптике получила название «иммерсионный объектив» [2] и в рассматриваемом случае оказывает фокусирующее действие на электронный пучок. Действительно, в электронных пушках, применяемых для прецизионной сварки, траектории электронов скрещиваются и образуется наименьшее сечение электронного

пучка, называемое кроссовером [2]. При проецировании кроссовера на изделие полем второй, магнитной, линзы, достигается предельная плотность мощности источника нагрева.

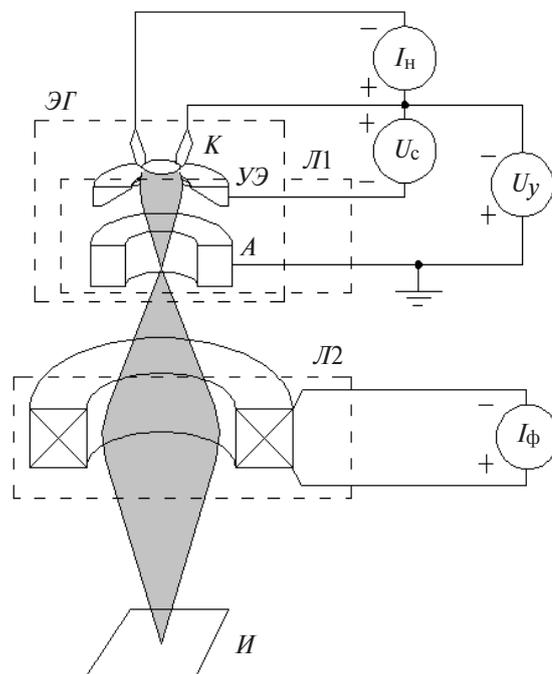


Рис. 1. Функциональная схема сварочной электронной пушки с электростатической и магнитной фокусировкой пучка

Ток электронного пучка, а значит и мощность источника нагрева, могут регулироваться путем изменения температуры катода  $T$  (за счет вариации тока накала  $I_H$ ), потенциала анода (ускоряющего напряжения  $U_y$ ) и потенциала управляющего электрода (напряжения смещения  $U_c$ ). Первые два способа не лишены недостатков. Например, процесс регулирования температуры катода характеризуется высокой инерционностью, из-за чего импульсное регулирование тока таким способом невозможно. При изменении ускоряющего напряжения источника питания смещается плоскость фокусировки и изменяются размеры пучка в плоскости кроссовера, что приводит к необходимости непрерывного регулирования фокусировки. Кроме того, такой способ регулирования технически сложен. Поэтому на практике обычно используется третий способ — регулирование потенциала управляющего электрода или напряжения источника питания смещения. При изменении потенциала управляющего электрода изменяется конфигурация поля в прикатодной области, что влияет одновременно на размеры «пятна эмиссии» катода и на положение кроссовера. Положение плоскости фокусировки при таком регулировании нарушается в меньшей степени, чем при изменении потенциала анода. Такой способ является и наименее энергетически затратным —

управляющий электрод служит только для ограничения тока пучка, и его источник питания практически работает в режиме х.х.

Таким образом, в процессе сварки для модуляции тока электронного пучка традиционно изменяют напряжение смещения  $U_c$ . Остальные параметры – ток накала катода и ускоряющее напряжение, стабилизируют. Требования к стабильности продиктованы влиянием хроматических aberrаций на размеры пятна нагрева. Даже незначительная пульсация ускоряющего напряжения (4–6%) вызывает существенное снижение плотности мощности, выделяемой в изделии в единицу времени (до 20–30%). При этом источник питания ускоряющего напряжения должен обеспечивать ограничение мощности вплоть до полного прерывания тока нагрузки при высоковольтном пробое. Пробои возникают чаще всего вследствие ионизации паров металла, остаточных газов, паров масел и характеризуются резким снижением сопротивления цепи «анод–катод» практически до нуля за время порядка 10 нс – 1 мкс [3]. С другой стороны, источник должен обеспечивать стабильность ускоряющего напряжения с отклонением от номинального значения не более 1% при модуляции тока нагрузки. Такие противоречивые требования к источникам электропитания в сочетании с высокими уровнями напряжений (десятки киловольт) во многом сдерживают появление новых разработок в этой области.

Таким образом, для исследования режима работы электронной пушки в режиме модуляции тока

нагрузки необходимо совместно рассматривать работу источника ускоряющего напряжения (ИУН) и источника напряжения смещения (ИНС). Функциональная схема ИУН и ИНС приведена на рис. 2. Современные источники питания сварочных электронных пушек строятся по схеме с так называемым автоматическим смещением, в которой стабилизация тока пучка осуществляется за счет управления напряжением смещения.

Источники питания, построенные по схеме с промежуточным преобразованием частоты, отличаются от традиционно используемых источников с трансформаторами высокого напряжения, работающих на промышленной частоте, меньшей инерционностью выходных цепей и уровнем запасенной энергии. Инерционность цепей «анод–катод» и «катод–управляющий электрод» мала и зависит только от емкости высоковольтных кабелей. Нагрузка источника питания напряжения смещения не изменяется в процессе работы оборудования, и в математической модели он вполне может быть представлен в виде инерционного звена. Активное сопротивление нагрузки источника ускоряющего напряжения, напротив, изменяется от бесконечно большого – в режиме токовой паузы, до значений порядка сотен килоом при амплитудном значении тока и далее до равного нулю при коротком замыкании в режиме пробоя пушки – в случае, если ток пробоя не ограничивается.

Традиционно для стабилизации ускоряющего напряжения применялись так называемые компен-

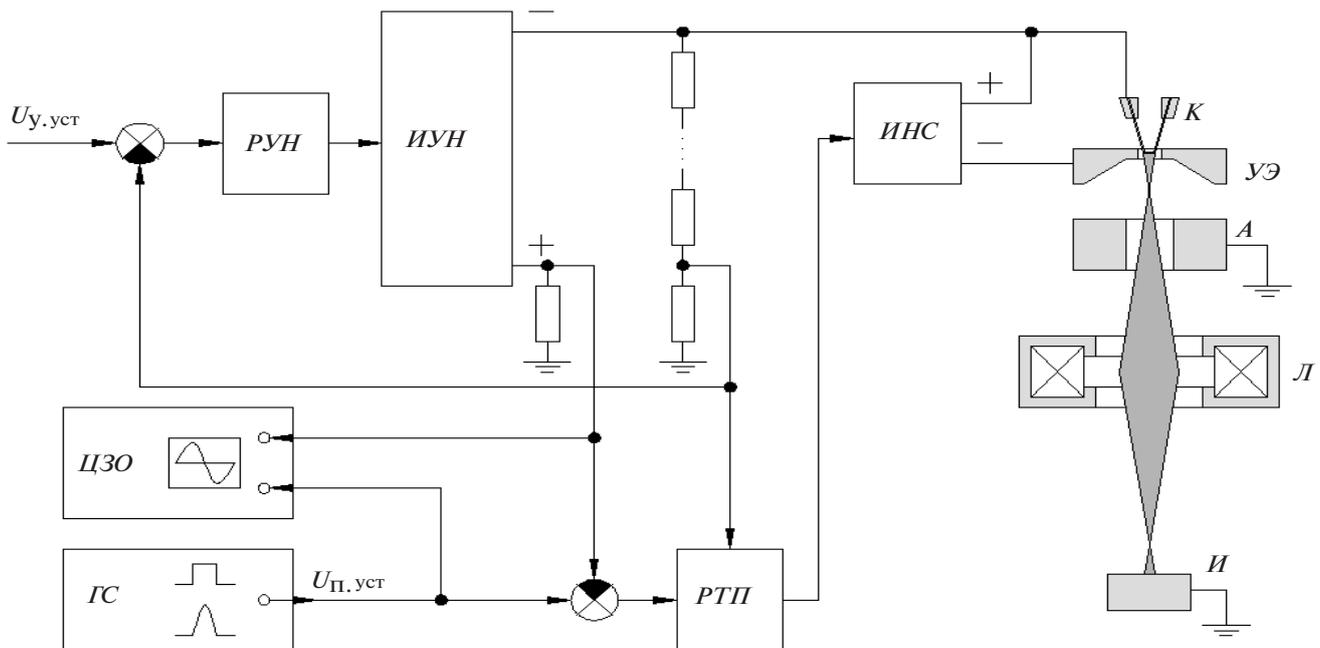


Рис. 2. Схема совместной работы источников питания ускоряющего напряжения ИУН и ИНС в режиме модуляции тока электронного пучка: РУН – регулятор ускоряющего напряжения; РТП – регулятор тока пучка; ГС – генератор сигналов; ЦЗО – цифровой запоминающий осциллограф; К – катод; А – анод; УЭ – управляющий электрод; Л – линза; И – изделие

сационные схемы или управляемые делители – последовательно с электронной пушкой между положительным выводом источника и корпусом установки подключалась регулирующая лампа или пролетный пентод. В такой схеме регулирующий элемент является практически безынерционным, так же как и сама электронная пушка. Регулирующий элемент в современных инверторных источниках расположен на стороне низкого напряжения, что увеличивает инерционность канала регулирования ускоряющего напряжения. Для настройки стабилизатора ускоряющего напряжения целесообразно определить динамические характеристики канала регулирования экспериментально.

**Синтез системы модуляции тока пучка.** Настройка системы осуществляется последовательно. На первом этапе задаются параметры регулятора ускоряющего напряжения РУН (обычно ПИ-регулятора) при постоянных значениях тока накала  $I_H$  и напряжении смещения  $U_C$ . Настройка проводится в статическом режиме, т.е. задается сначала ток луча, равный нулю, затем – максимальный и определяется значение отклонения ускоряющего напряжения  $\Delta U_y$  от уставки  $U_{y,уст}$ . Пропорциональный коэффициент ПИ-регулятора определяется методом последовательных приближений. В качестве критерия при определении пропорционального коэффициента целесообразно рассматривать отклонение ускоряющего напряжения от номинального значения, которое в статическом режиме не должно превышать 1%. В динамическом режиме пульсации ускоряющего напряжения будут превышать указанное значение из-за инерционных свойств источника питания и регулятора. Такой режим является наиболее «жестким» и вызывает максимальные пульсации ускоряющего напряжения  $\Delta U_y$ . Установлено, что для снижения пульсаций напряжения целесообразно использовать пропорционально-интегральный закон регулирования. Введение ПИ-регулятора вместо пропорционального обеспечивает устранение перерегулирования и, как следствие, снижение пульсаций до уровня не более 1% амплитудного значения.

На следующем этапе осуществляется настройка регулятора тока пучка РТП. Целью настройки является обеспечение стабилизации тока луча с точностью не ниже 5% в диапазоне регулирования тока от нуля до номинального. Кроме того, на этом этапе необходимо обеспечить переходный процесс без перерегулирования при заданном быстродействии (обычно 50–100 мкс). При выполнении этого условия обеспечивается работа источника с частотой модуляции тока до 1 кГц.

Поскольку ток луча нелинейно зависит от напряжения смещения, а потенциал «запирающего

пушки является функцией ускоряющего напряжения (рис. 3), то использовать ПИ-регулятор нецелесообразно. Так, при малых значениях коэффициента усиления регулятора не обеспечивается запирающее действие пушки, а дальнейшее его увеличение приводит к возбуждению системы. Поэтому предлагается ввести в систему коррекцию (рис. 2), обеспечивающую подачу на вход источника питания смещения отрицательного сигнала, пропорционального заданию ускоряющего напряжения. Такая система, относящаяся к классу компенсационных систем [4], обеспечивает отрицательный сигнал на входе источника питания смещения для запирающего пушки при задании тока луча, равного нулю. Как показали исследования, в этом случае для устранения перерегулирования целесообразно использовать пропорционально-дифференциально-интегральный (ПИД) регулятор.

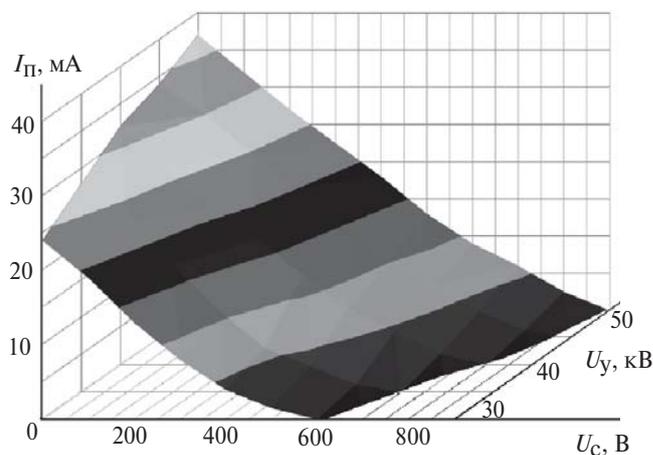


Рис. 3. Зависимость тока электронного пучка от ускоряющего напряжения и напряжения смещения при постоянном токе накала катода

Осциллограмма импульсов тока, полученных при указанных настройках регулятора, частоте задающего генератора 1 кГц и амплитуде тока 8 мА, приведена на рис. 4. В соответствии с рис. 4 неустойчивость ускоряющего напряжения в импульсном режиме составляет

$$\Delta U_{y,дин} = \frac{(49975 - 49915)}{50000} = 0,12\%.$$

Поскольку значение пульсаций  $\Delta U_{y,дин}$  значительно меньше ускоряющего напряжения ( $U_y = 50$  кВ), то для удобства сравнения на осциллограмме рис. 4 пульсации  $\Delta U_{y,дин}$  приведены в увеличенном масштабе ( $\times 10^4$ ).

Использование приведенной в статье методики настройки стабилизаторов источников питания электронной пушки для прецизионной сварки выявило ее эффективность. Исследования, проведенные в МЭИ(ТУ) совместно с ОАО «ЭлектроИн-

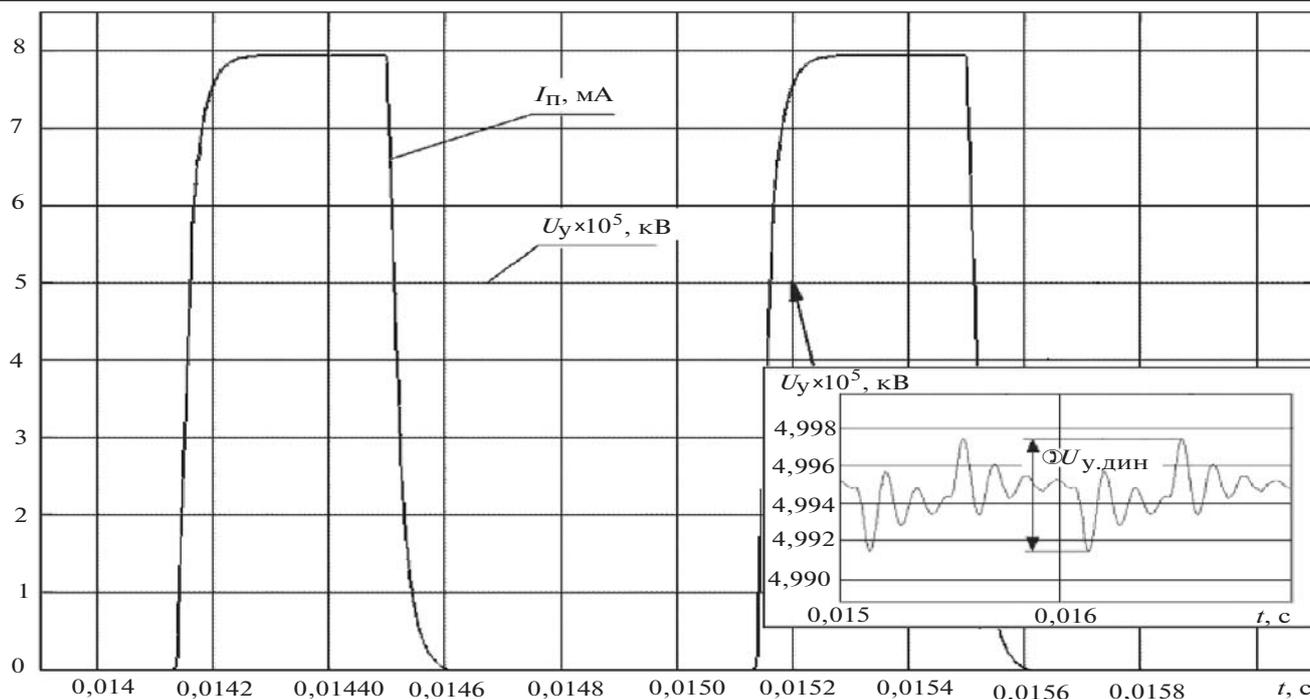


Рис. 4. Осциллограммы тока пучка  $I_{п}$  и ускоряющего напряжения  $U_y$ , снятые в режиме импульсной модуляции тока

тел», показали перспективность создания инверторных источников электропитания повышенной частоты с импульсной модуляцией тока электронного пучка с частотами до 1 кГц.

Регулирование тепловой мощности, выделяемой в изделии при сварке в импульсном режиме, осуществляется путем изменения длительности и частоты импульсов. Таким образом, решается задача повышения воспроизводимости геометрических характеристик электронного пучка, так как напряжение смещения, влияющее на положение фокальной плоскости, не изменяется. При работе в импульсном режиме для повышения энергетической эффективности целесообразно использовать режим «насыщения» или максимального тока эмиссии, определяемого температурой катода.

Использование цифровой техники для управления параметрами электронно-лучевой сварки и обработки в импульсном режиме позволяет регулировать значение энергии, выделяемой в изделии. Путем изменения не только частоты, но формы импульсов можно изменять характер протекания тепловых, гидродинамических, газодинамических и металлургических процессов при формировании шва. Однако для выявления основных закономерностей управления формированием сварного шва необходимы дополнительные исследования.

**Исследование процессов взаимодействия электронного пучка с металлами при сварке в импульсном режиме.** Известно, что формирование шва с большим отношением глубины к ширине при элект-

ронно-лучевой сварке обеспечивается за счет высокой плотности мощности теплового источника, возникающего в изделии при электронной бомбардировке. В процессе интенсивного испарения металла из-за давления паров поверхность жидкой фазы металла деформируется, что и приводит к образованию парогазового канала. Энергетическая эффективность процесса электронно-лучевой обработки зависит от условий теплоотвода, отражения первичных электронов от изделия потерь на нагрев и ионизацию паров металла, а также других факторов. Скорость нагрева, так же как и скорость охлаждения, определяет форму шва, механические свойства материала и дефектообразование. Поэтому очевидно, что гибкость управления параметрами электронно-лучевой сварки может быть повышена путем выбора рациональной формы импульсов управления током электронного пучка. Эта задача может быть решена с использованием программных генераторов сигналов и цифроаналоговых преобразователей.

Для сравнительного анализа влияния формы импульсов тока электронного пучка на процесс формирования сварочной ванны рассмотрим два режима импульсной электронно-лучевой обработки (рис. 5,а и 6,а). Сигналы имеют одинаковую длительность и период. В первом случае импульс имеет прямоугольную форму, во втором – форму синусоидального напряжения на полупериоде. Причем для сохранения в обоих случаях удельной энергии на одном и том же уровне необходимо, чтобы площадь обеих кривых за период была оди-

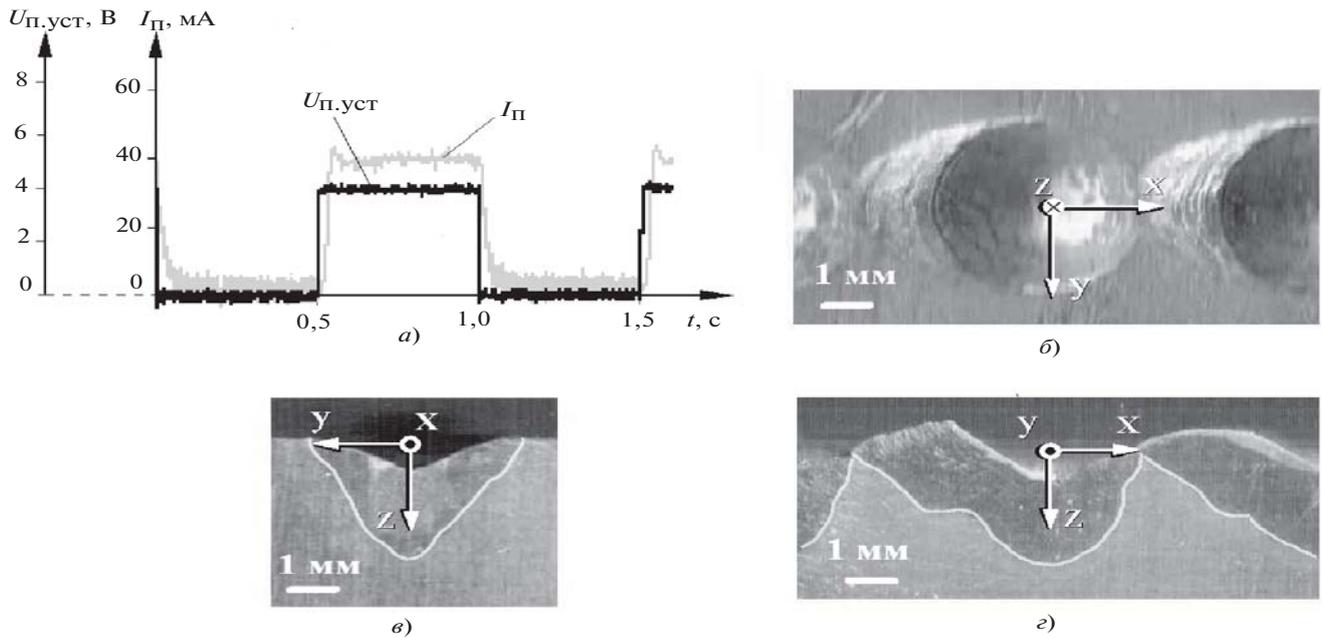


Рис. 5. Картина воздействия импульса прямоугольной формы: *a* – осциллограмма импульса управляющего сигнала и текущего значения тока электронного пучка; *б* – вид сверху на области проплавления; *в* и *г* – продольный и поперечный макрошлифы

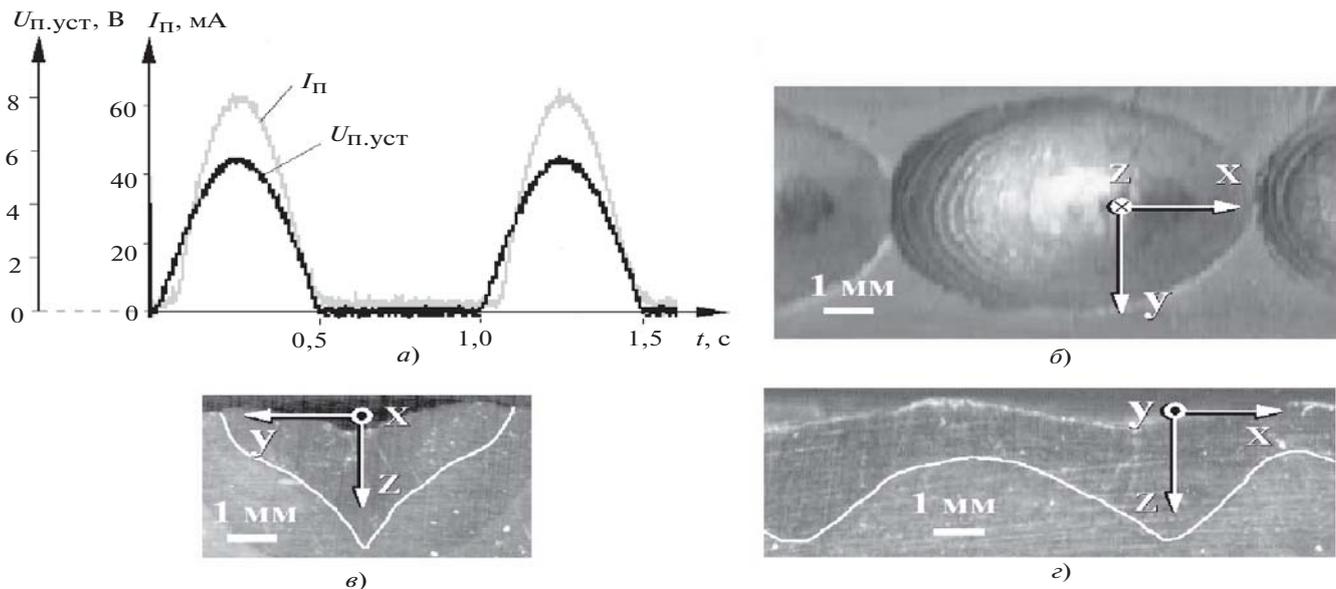


Рис. 6. Картина воздействия импульса синусоидальной формы: *a* – осциллограмма импульса управляющего сигнала и текущего значения тока электронного пучка; *б* – вид сверху на области проплавления; *в* и *г* – продольный и поперечный макрошлифы

накова. В этом случае амплитуда импульса, ограниченного синусоидальной кривой на интервале от 0 до  $\pi$ , должна быть больше амплитуды прямоугольного импульса в  $N$  раз, где

$$N = \frac{A\pi}{\int_0^{\pi} A \sin(t) dt} = \frac{\pi}{2} = 1,57.$$

Экспериментальные исследования проводились на установке ЭЛА-50/5 М при ускоряющем напряжении 40 кВ. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. К управляющему входу стаби-

лизатора тока электронной пушки был подключен генератор сигналов (ГС) типа Г6-26. Для регистрации сигналов был использован цифровой запоминающий осциллограф Tektronix TDS2024В. Для регистрации сигнала тока пучка  $U_{п.уст}$  к измерительному шунту ИУН был подключен первый вход осциллографа. Для измерения сигнала управления током  $U_{п.уст}$  вход управления РТП подключался ко второму входу осциллографа. Частота следования импульсов равна 1 Гц, а длительность 0,5 с.

На рис. 5,а приведена осциллограмма импульса управляющего сигнала  $U_{п.уст}$  и тока пучка  $U_{п.уст}$ .

На рис. 5,б–г приведены фотографии области проплавления и макрошлифы, полученные при сварке с модуляцией тока импульсами прямоугольной формы с амплитудой 40 мА. Материал образца – сплав АМг2, толщина 20 мм, скорость перемещения образца относительно пучка 30 м/ч. На рис. 6 приведены осциллограммы тех же сигналов, фотографии и макрошлифы, но при модуляции тока пучка сигналами синусоидальной формы с амплитудой тока 63 мА. Фокусировка пучка осуществлялась на поверхности изделия при амплитудном значении тока пучка.

Из осциллограмм видно, что канал управления током электронного пучка характеризуется инерционностью и работает с задержкой, составляющей около 20 мс. Формы областей проплавления, полученные при импульсном воздействии, сильно отличаются. Так, в случае прямоугольного импульса ширина шва оказалась меньше и более постоянна по глубине. В то же время, из-за более быстрого прекращения действия теплового источника образуются глубокий кратер (около 1,5 мм) и область усиления шва (вытесненный давлением паров и конвективными процессами металл). В случае же импульсов синусоидальной формы ширина шва почти в 1,5 раз больше. Отмеченное можно объяснить двумя основными причинами. Во-первых, в течение переднего фронта и спада импульса значение тока пучка меньше 40 мА, поэтому поверхность жидкой ванны не деформируется и все тепло выделяется на поверхности изделия. Во-вторых, возможно из-за изменения потенциала управляющего электрода изменяются условия фокусировки электронного пучка и плотность мощности снижается. Однако можно констатировать тот факт, что глубина проплавления во втором случае в среднем на 20% больше, чем в первом, хотя ширина области и проплавления по глубине резко уменьшается. Таким образом, можно предположить, что, с одной стороны, максимальная скорость испарения при переходе от прямоугольного импульса тока к синусоидальному увеличивается, но время существования парогазового канала уменьшается. Снижается и скорость кристаллизации, о чем свидетельствует форма поверхности расплавленной области. Глубина кратера составляет менее 0,5 мм, а усиление шва практически отсутствует. Таким образом, плавное уменьшение тока луча в случае импульсов длительностью 0,5 с дает такой же эффект, как и процедура «выведения кратера» [5], которую применяют для повышения качества кольцевых сварных швов.

Приведенный пример показывает, что форма импульса тока электронного пучка оказывает существенное влияние на процессы формирования шва. Теоретически, повышая частоту следования импульсов до значений порядка 10–100 Гц, можно обеспечить режим формирования непрерывного

сварного шва с заданными характеристиками (формой канала проплавления, его шириной) и регулировать размеры зоны термического влияния. Параметры обработки в этом случае могут быть связаны с характеристиками материалов, геометрическими размерами изделий и значением удельной энергии.

**Выводы.** 1. Для повышения стабильности параметров электронного пучка предложена методика настройки стабилизаторов ускоряющего напряжения и тока электронного пучка, которая может быть использована при разработке источников электропитания технологических электронных пушек, работающих в импульсном режиме.

2. Ведение сварки при модуляции тока электронного пучка импульсами прямоугольной формы, с одной стороны, является наиболее «жестким» режимом для источников электропитания, но, с другой стороны, обеспечивает постоянство положения фокусной плоскости при сохранении возможности регулирования тепловой энергии, выделяемой в изделии. На основании теоретических и экспериментальных исследований выявлены требования к показателям качества регулирования и диапазоны изменения выходных величин.

3. Форма сигналов управления стабилизатором тока электронного пучка влияет на тепловые, металлургические, гидродинамические и газодинамические процессы формирования сварного шва. Оснащение оборудования для прецизионной сварки генератором сигналов заданной формы расширит технологические возможности современного сварочного оборудования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Schultz H.** Electron beam welding. – Cambridge Woodhead Publishing the Welding Institute, 1993.
2. **Жигарев А.А.** Электронная оптика и электронно-лучевые приборы: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1972.
3. **Щербаков А.В., Беневольский Е.С.** Исследование переходных процессов возникновения пробоев в сварочных электронных пушках. – Вестник МЭИ, 2011, № 1.
4. **Душин С.Е., Зотов Н.С., Имаев Д.Х. и др.** Теория автоматического управления: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб./Под ред. В.Б. Яковлева. – М.: Высшая школа, 2005.
5. **Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.Н. и др.** Электронно-лучевая сварка /Под ред. Б.Е. Патона. – Киев: Наукова думка, 1987.

[18.07.11]

*Автор: Щербаков Алексей Владимирович окончил Московский энергетический институт (МЭИ) по специальности «Электротехнологические установки и системы» в 2005 г. В 2008 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка системы управления установки прецизионной электронно-лучевой сварки» в МЭИ (ТУ). Докторант кафедры «Физика электротехнических материалов и компонентов, автоматизированных электротехнологических комплексов» МЭИ (ТУ).*