

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОНЦЕНТРИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С МЕТАЛЛОМ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ



В.Я. Беленький,
Пермский национальный
исследовательский
политехнический университет



Д.Н. Трушников,
Пермский национальный
исследовательский
политехнический университет

Проведены исследования параметров спектра колебаний тока несамостоятельного разряда, который формируется в плазме в зоне электронно-лучевой сварки мощным концентрированным электронным пучком. Исследованы колебания тока несамостоятельного разряда при осцилляции электронного пучка в различных частотных диапазонах, в том числе с использованием метода синхронного накопления.

Ключевые слова: *электронный пучок, электронно-лучевая сварка, канал проплавления, осцилляция электронного пучка, несамостоятельный разряд в плазме.*

Высокая концентрация мощности в электронном пучке, ведение процесса электронно-лучевой обработки в вакууме, легкость управления вводом энергии в металл, глубокая проникающая способность обуславливают широкие технологические возможности электронных пучков, которые используются для плавки, сварки, термообработки, сверления и других технологических операций.

Процессы, протекающие в области взаимодействия мощного концентрированного электронного пучка с металлом при электронно-лучевой сварке, крайне сложны и до настоящего времени до конца не изучены, что приводит к трудно-

стям получения бездефектных сварных швов. Наиболее серьезными проблемами при этом являются:

- формирование специфической конфигурации зоны проплавления в поперечном сечении шва с уширенной верхней зоной и узкой остальной частью сварного шва, что приводит к возникновению дефектов в корне сварного шва – пикообразования, пустот и несплавлений (рис. 1) [5, 6, 8];

- сложность воспроизведения глубины и формы проплавления, определяемыми, в первую очередь, фокусировкой электронного пучка, которая является одним из важнейших технологических па-

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ-Урал № 11-08-96016 и при финансовой поддержке Министерства образования Пермского края.

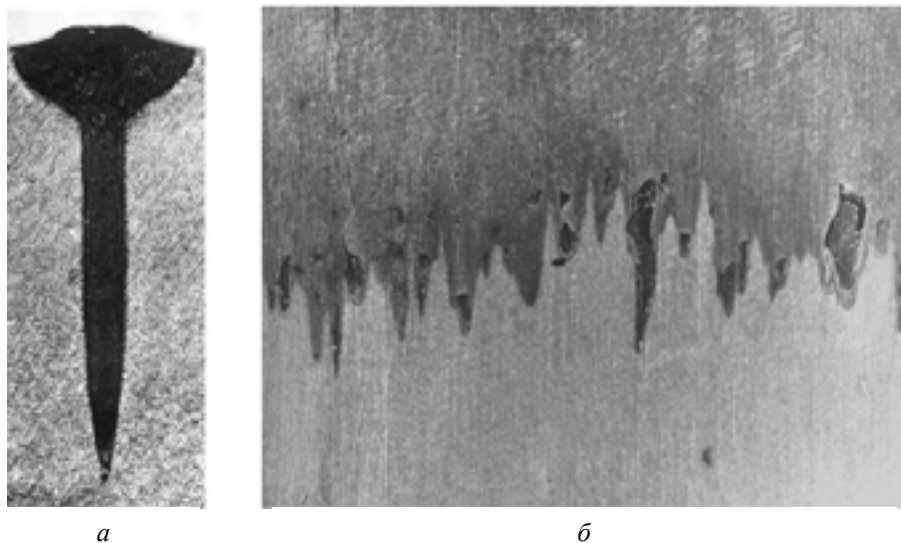


Рис. 1. Конфигурации зоны проплавления и специфические дефекты при электронно-лучевой сварке: а – поперечное сечение сварки; б – фрагмент продольного сечения шва с корневыми дефектами

раметров электронно-лучевой сварки и не всегда однозначно связана с током фокусирующей электромагнитной линзы вследствие возможного изменения во времени геометрических характеристик электронно-оптической системы электронной пушки.

Проблема разработки бездефектных технологий электронно-лучевой сварки требует решения вопросов, связанных с управлением процессом взаимодействия электронного пучка со свариваемым металлом с целью стабилизации этого процесса и обеспечения воспроизводимости термических параметров нагрева металла. Управление процессом электронно-лучевой сварки может быть осуществлено при реализации оперативного контроля параметров взаимодействия электронного пучка с металлом, и в частности, проникновения электронного пучка в металл.

Одним из характерных явлений, сопутствующих взаимодействию концентрированного электронного пучка с металлом при электронно-лучевой сварке, является образование в зоне обработки низкотемпературной плазмы [2, 3, 17]. При этом параметры процессов, протекающих в плазме, тесно связаны с характеристиками терми-

ческого воздействия электронного пучка на материал. Это открывает возможности изучения процессов взаимодействия электронного пучка с металлом и осуществления оперативного контроля за процессом электронно-лучевой сварки.

Важная роль плазмы, образующейся в зоне электронно-лучевой сварки мощным электронным пучком, состоит в том, что она служит источником заряженных частиц, параметры которых несут информацию о процессе взаимодействия электронного пучка с металлом. Являясь потенциальной ловушкой для медленных электронов, плазма обеспечивает прохождение значительного по величине тока, направленного от обрабатываемого изделия к близлежащим участкам технологической вакуумной камеры или установленному над зоной обработки коллектору заряженных частиц.

Обусловленный этими процессами несамостоятельный разряд в плазме в зоне электронно-лучевой сварки имеет специфический характер по сравнению с другими типами разрядов, поддерживаемых электронным пучком в результате доминирующей роли пучка, который выполняет следующие функции:

– обеспечивает квазинепрерывное поступление металлического пара в зону разряда в результате интенсивного испарения обрабатываемого металла;

– стимулирует генерацию низкотемпературной плазмы в зоне разряда путем ионизации паров металла с использованием механизма резонансного пучково-плазменного взаимодействия;

– инициирует интенсивную эмиссию электронов с поверхности конденсированной фазы металла, обеспечивая значительную величину тока в плазме.

Для отбора тока из плазмы и формирования самостоятельного разряда может быть использован коллектор электронов, устанавливаемый над зоной сварки и имеющий положительный потенциал относительно обрабатываемого изделия.

Процесс взаимодействия электронного пучка с металлом при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением носит периодический характер [4, 7, 9, 14]. Колебательные процессы в канале проплавления, образуемом в металле электронным пучком, обуславливают наличие в спектре колебаний тока самостоятельного разряда в плазме соответствующих компонент, а сам спектр колебаний является электрической моделью колебаний в канале проплавления [1, 11, 13, 16].

До настоящего времени взаимосвязь спектра колебаний тока в плазме с параметрами процесса взаимодействия электронного пучка с металлом при электронно-лучевой обработке с глубоким проплавлением до конца не изучена. Поэтому целью данной работы являлось экспериментальное исследование взаимосвязи спектра тока самостоятельного разряда в плазме с параметрами процесса воздействия мощного концентрированного электронного пучка на металл в условиях электронно-лучевой сварки с глубоким проникновением электронного пучка в металл при использовании статического и осциллирующего пучка. В частности, ставилась задача уточнения физической природы высокочастотных колебаний в спектре тока самостоятельного разряда в плазме (с

частотой порядка 10^4 Гц) и проверки существующих гипотез о причинах этих колебаний. Согласно одной из них, эти колебания отражают процессы в канале проплавления, связанные с взрывным характером нагрева и вскипания металла («микровзрывами») при воздействии на него электронного пучка (в этом случае плазма выступает в качестве проводника пульсирующего термоэлектронного тока) [5, 6].

Другая гипотеза предполагает, что данные колебания отражают автоколебательные процессы в плазме при формировании самостоятельного разряда [15].

В процессе проведения экспериментов производились проходы электронным пучком по цилиндрическим образцам на электронно-лучевой сварочной установке с энергетическим агрегатом ЭЛА-6ВЧ производства фирмы SELMI (Украина). При выполнении проходов компьютерной информационно-измерительной системой, оснащенной высокоскоростным аналого-цифровым интерфейсом, регистрировался ток самостоятельного разряда в плазме с помощью коллектора электронов, установленного над зоной сварки (рис. 2) [10].

При экспериментальных исследованиях варьировались технологические параметры обработки (в том числе параметры осцилляции электронного пучка), обрабатываемые материалы, рабочая дистанция (расстояния от среза электронно-лучевой пушки до обрабатываемого изделия), расстояние от коллектора вторичного тока в плазме до обрабатываемого изделия, напряжение на коллекторе, начальная температура обрабатываемого образца.

На первом этапе анализировалась структура тока самостоятельного разряда в плазме при электронно-лучевой сварке концентрированным электронным пучком. Было установлено, что спектр регистрируемого сигнала при всех исследованных режимах сварки содержит ярко выраженную периодическую составляющую на частоте порядка 20 кГц (рис. 3).

Анализ осциллограмм показал, что наличие в спектре этой составляющей обусловлено присутствием в регистрируемом

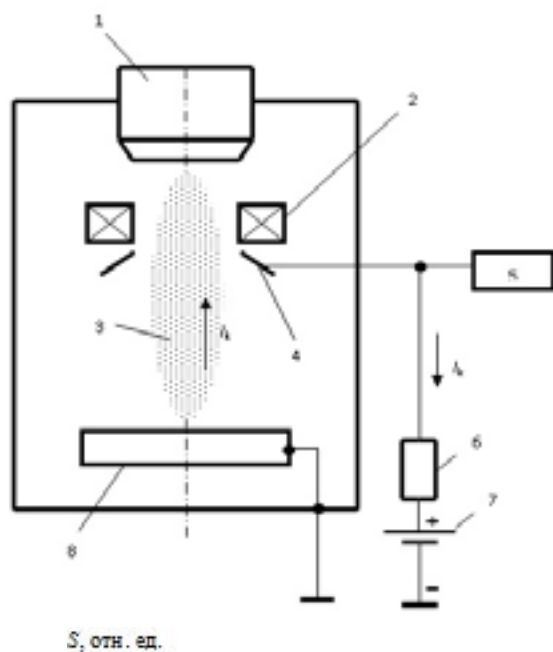


Рис. 2. Схема регистрации тока несамостоятельного разряда в плазме, образующейся над зоной электронно-лучевой сварки:
 1 – электронная пушка;
 2 – фокусирующая линза;
 3 – плазма, образующаяся над зоной электронно-лучевой сварки;
 4 – коллектор электронов;
 5 – информационно-измерительная система;
 6 – резистор нагрузки;
 7 – источник смещения;
 8 – свариваемое изделие

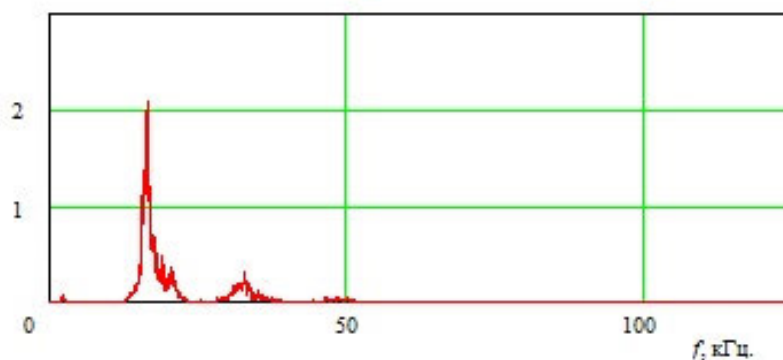


Рис. 3. Спектральное распределение сигнала переменной составляющей тока коллектора в диапазоне частот f от 5 до 125 кГц (мощность электронного пучка ~ 5 кВт)

сигнале резких пиков (импульсов), следующих друг за другом практически регулярно. Эти импульсы имеют стохастически изменяющуюся амплитуду и следуют друг за другом сериями, через случайные промежутки времени между сериями. При этом импульсы тока имеют значительную величину (до 0,5 А). По порядку величины частота их много ниже известных частот ленгмюровских колебаний плазмы, формируемой в зоне воздействия электронного пучка при сварке. Подобный характер осциллограмм и спектрограмм наблюдался практически при всех режимах сварки с глубоким проплавлением мощностью от 2 кВт для всех исследованных материалов.

Было установлено, что частота указан-

ной составляющей не зависит явным образом от режима фокусировки и от мощности сварки, а структура составляющей несет информацию о режиме фокусировки электронного пучка. На осциллограммах, полученных после фильтрации вторичного сигнала, отчетливо наблюдалось изменение характера сигналов. При переходе от недофокусированного режима к режиму острого фокуса сигнал становился прерывистым, далее – снова более регулярным на перефокусированных режимах. С математической точки зрения это означает, что сигнал при приближении режима к режиму острой фокусировки все чаще находится в районе нулевых значений. Здесь очень полезной оказалась

статистическая обработка. Установлено, что параметры эмпирической плотности сигнала несут информацию об удельной мощности (режиме фокусировки в процессе сварки) и могут быть использованы для оперативного контроля.

В результате анализа спектра тока несамостоятельного разряда в плазме при электронно-лучевой сварке было подтверждено существование «микровзрывов» с временными параметрами, совпадающими с результатами аналитических оценок академика Н.Н. Рыкалина, который выдвинул гипотезу о взрывном характере взаимодействия электронного пучка с металлом [5]. Согласно этой гипотезе, скорость ввода энергии в области взаимодействия электронного пучка с металлом в канале проплавления значительно превышает скорость ее отвода за счет теплопроводности. При этом возникают локальные перегревы металла выше температуры кипения с последующими взрывоподобными вскипаниями. Пары испаряющегося металла оказывают на электронный пучок экранирующее воздействие, и удельная мощность рассеянного на парах пучка резко уменьшается. После того как пары эвакуируются из полости канала проплавления, удельная мощность электронного пучка снова становится выше критической, и процесс возобновляется. Предсказанные этой гипотезой частоты близки к наблюдаемым экспериментально для сталей и титановых сплавов. Кроме описанных процессов, на взаимодействие мощного электронного пучка с металлом оказывает влияние ионная самофокусировка пучка в плазме паров металла [15].

Режим взрывного разрушения металла на передней стенке канала проплавления определяет импульсный характер эмиссии электронов из области воздействия электронного пучка, что связано с интенсивным испусканием электронного тока при переходе металла из конденсированного состояния в плотную пароплазменную фазу. Оценка плотности тока термоэлектронной эмиссии по уравнению Ричардсона показывает, что при температуре кипения

железа величина тока эмиссии при площади пятна нагрева 1 мм^2 составляет около 1 А , а при перегреве металла на $1000 \text{ }^\circ\text{С}$ – около 100 А . Это свидетельствует о высоких возможных значениях тока эмиссии в плазму в процессе электронно-лучевой сварки мощным концентрированным электронным пучком. Однако фактическая величина тока несамостоятельного разряда в плазме при электронно-лучевой сварке определяется условиями токопрохождения в плазме и существенно зависит от распределения потенциала в плазме и параметров внешней цепи.

При увеличении рабочей дистанции амплитуда колебаний уменьшается, что объясняется снижением концентрации плазмы. Повышение напряжения на коллекторе электронов приводит к увеличению амплитуды высокочастотных колебаний тока несамостоятельного разряда в плазме. Изменение напряжения на коллекторе производилось в пределах от 20 до 70 В для того, чтобы оставаться на участке насыщения зондовой характеристики коллектора.

При увеличении начальной температуры обрабатываемого образца высокочастотные колебания в регистрируемом сигнале возникают при меньшей удельной мощности. Влияние температуры в области взаимодействия электронного пучка с металлом подтверждается также экспериментами при воздействии электронного пучка на различные материалы. Исследовались процессы при сварке образцов из сталей (высоколегированных хромоникелевых и хромомолибденовых), из меди и ее сплавов, алюминия и титана. Установлено, что ярко выраженная высокочастотная составляющая в спектре вторичного тока в плазме наблюдается при сварке сталей и титана. При электронно-лучевой сварке сталей характерные частоты колебаний составляют $18\text{--}25 \text{ кГц}$. При сварке титана и алюминиевых сплавов высокочастотная составляющая незначительно сдвигается в область более низких частот ($10\text{--}18 \text{ кГц}$). При сварке медных сплавов высокочастотных коле-

баний в исследованном диапазоне режимов практически не наблюдается.

На втором этапе исследовалась структура тока несамостоятельного разряда в плазме при электронно-лучевой сварке с осцилляцией электронного пучка с высокими (порядка 10^4 Гц) и низкими (порядка 10^2 Гц) частотами.

Эксперименты показали, что при осцилляции с частотами порядка 10^4 Гц максимум в спектре регистрируемого сигнала при этом сдвигается по оси частот на величину частоты воздействия, увеличиваясь при приближении частоты к «собственной» частоте «микровзрывов». На рис. 4 приведен спектр тока несамостоятельного разряда в плазме в час-

тотном диапазоне 1–60 кГц при электронно-лучевой сварке осциллирующим электронным пучком с частотой 11,2 кГц. Из графика видно, что максимум в спектре находится на частоте 22 кГц, в то время как при сварке статическим пучком максимум наблюдался на частоте 20 кГц.

При воздействии на этих частотах глубина канала проплавления при электронно-лучевой сварке и ширина его корня практически не изменяются по сравнению со сваркой статическим лучом (рис. 5), хотя до настоящего времени считалось, что воздействие на столь высоких частотах должно приводить к уменьшению плотности энергии и, как следствие, уменьшению глубины проплавления вме-

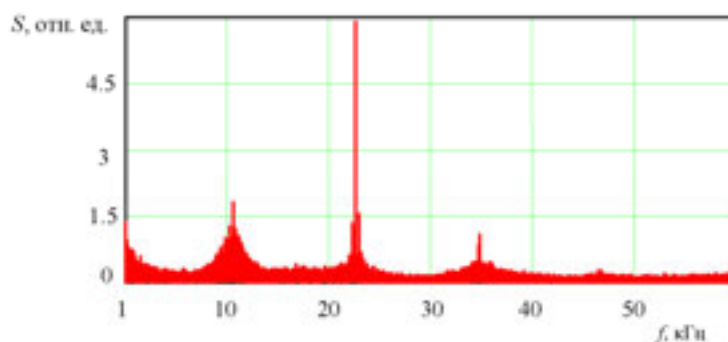


Рис. 4. Спектральное распределение S переменной составляющей тока несамостоятельного разряда в плазме в диапазоне частот f 1–60 кГц при сварке с осцилляцией электронного пучка (частота осцилляции 11,2 кГц)

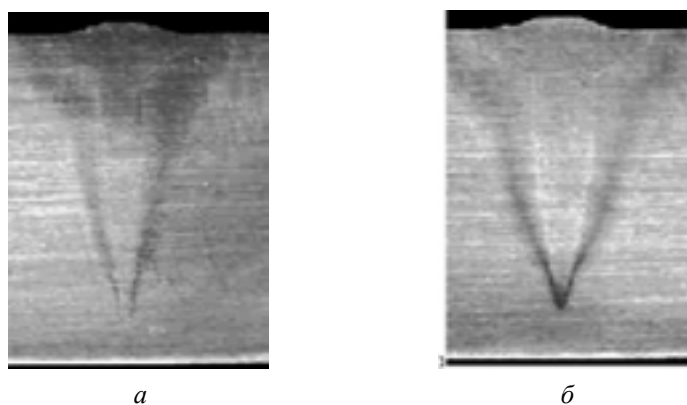


Рис. 5. Конфигурация зон проплавления при электронно-лучевой сварке остросфокусированным электронным пучком (мощность пучка ~ 3 кВт): а – статический электронный пучок (глубина проплавления 13,8 мм, ширина зоны проплавления: в верхней уширенной части 4,9 мм, в средней части 1,9 мм); б – осциллирующий в поперечном направлении электронный пучок (глубина проплавления 13,5 мм, ширина зоны проплавления: в верхней уширенной части 5,7 мм, в средней части 2,2 мм)

сте с увеличением ширины корня сварного шва. Согласно этой точке зрения, при применении амплитуд развертки (~1 мм) удельная мощность должна была бы снизиться в несколько раз и, следовательно, вызвать существенное снижение глубины проплавления. Отсутствие такого влияния еще раз свидетельствует о наличии высокочастотных автоколебательных процессов в канале проплавления и требует учета этого факта при разработке моделей процессов электронно-лучевой обработки с глубоким проплавлением.

Далее был исследован процесс электронно-лучевой сварки с осцилляцией электронного пучка с частотами порядка 10^2 Гц. В процессе электронно-лучевой сварки с глубоким проплавлением происходит стохастическое перемещение зоны взаимодействия электронного пучка с металлом по глубине канала проплавления. При этом сигнал, получаемый при регистрации тока несамостоятельного разряда в плазме, имеет максимальные значения при взаимодействии пучка с верхними областями канала проплавления.

В процессе экспериментальных исследований было установлено, что при осцилляции электронного пучка с небольшой амплитудой и частотами порядка 10^2 Гц наблюдаются резонансные явления, происходит регуляризация указанного автоколебательного процесса, а в спектре регистрируемого сигнала появляется максимум на частоте, кратной частоте осцилляции. Частота основной гармоники

вторичного сигнала равна удвоенной частоте осцилляции при развертке электронного пучка поперек стыка (рис. 6).

При сварке с осцилляцией электронного пучка в направлении скорости его движения в спектре тока несамостоятельного разряда появляются две характерные гармоники – на частоте осцилляции и на удвоенной частоте.

Соотношение между амплитудами гармоник зависит от режима фокусировки, что свидетельствует об изменении характера взаимодействия электронного пучка со стенками канала проплавления. Данный факт может иметь большое практическое значение в связи с тем, что это открывает возможность создания быстродействующей системы контроля режима фокусировки электронного пучка при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением.

Для анализа сигнала тока несамостоятельного разряда в плазме при электронно-лучевой сварке с осцилляцией электронного пучка с частотой порядка 10^4 Гц был использован метод синхронного накопления [12], являющийся модификацией метода синхронного детектирования. Опорный сигнал $g(t)$ для синхронного детектирования формировался из сигнала в отклоняющих катушках и представлял собой прямоугольные колебания малой скважности (рис. 7).

Опорный сигнал $g(t+\tau)$, сдвинутый на время τ ($0 < \tau < T$, где T – период сигнала в отклоняющих катушках), умножался на величину регистрируемого сигнала

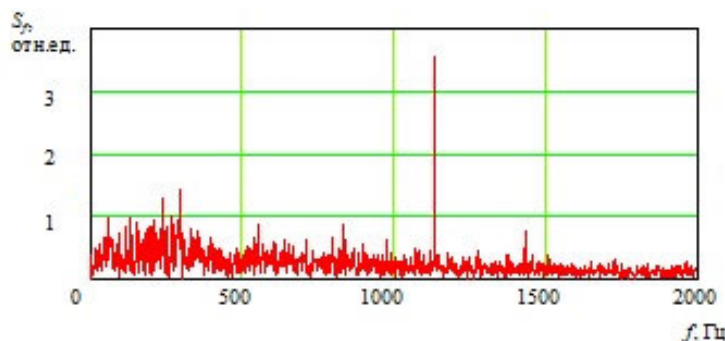


Рис. 6. Низкочастотная область спектра сигнала тока несамостоятельного разряда в плазме при электронно-лучевой сварке с осцилляцией электронного пучка в направлении, перпендикулярном направлению скорости сварки (мощность пучка ~3 кВт, частота осцилляции 561 Гц, амплитуда развертки 0,9 мм)

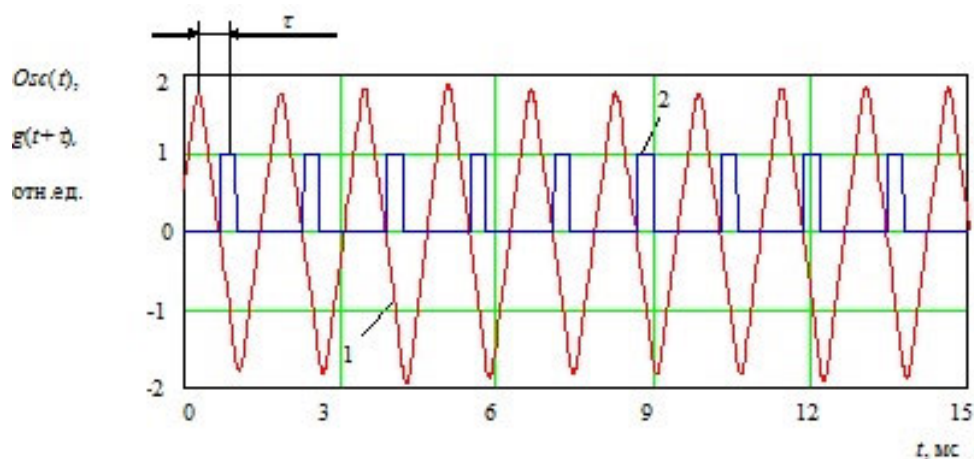


Рис. 7. Формирование опорного сигнала: 1 – осциллограмма тока отклоняющей катушки $Osc(t)$ при отклонении электронного пучка в направлении скорости сварки; 2 – сформированный опорный сигнал $g(t+\tau)$; 3 – сдвиг опорного сигнала относительно сигнала отклоняющей катушки τ

$Data(t)$ и затем интегрировался (суммировался или усреднялся) по времени t .

Результатом данных преобразований являлась функция $S(\tau)$, описывающая изменение результата синхронного детектирования в зависимости от сдвига опорного сигнала

$$S(\tau) = \int_0^{t_0} g(t + \tau) \cdot Data(t) dt,$$

где t_0 – время выборки.

Функция $S(\tau)$ позволяет проанализировать синхронизацию процессов в канале проплавления с сигналами в отклоняющей системе электронной пушки.

Осциллограмма тока несамостоятель-

ного разряда в плазме имеет вид серий высокочастотных импульсов, которые, как и при сварке модулированным электронным пучком [11], следуют друг за другом в значительной степени регулярно, с частотой порядка 10...30 кГц, и имеют значительную величину, которая зависит от условий отбора тока из плазмы (в проведенных экспериментах достигала 1 А) (рис. 8).

Результат, полученный при обработке регистрируемого сигнала методом синхронного накопления при осцилляции электронного пучка в направлении, перпендикулярном направлению скорости сварки, приведен на рис. 9, а. Полученная

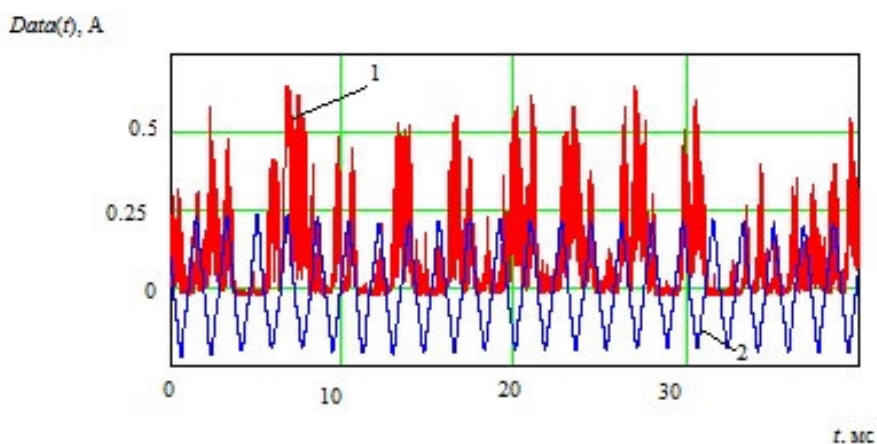


Рис. 8. Осциллограмма тока несамостоятельного разряда в плазме $Data(t)$ и сигнал тока в отклоняющей катушке при сварке с осцилляцией электронного пучка в направлении, перпендикулярном направлению скорости сварки

функция $S(\tau)$ практически симметрична. При смещении луча на боковые стенки канала проплавления зона взаимодействия электронного пучка с металлом поднимается по высоте, что приводит к увеличению вторичного сигнала. На рис. 9, б функция $S(\tau)$ отображена в фазовом пространстве «сигнал–смещение электронного пучка в канале проплавления».

На рис. 10 приведены зависимости, полученные при электронно-лучевой сварке остросфокусированным электронным пучком с осцилляцией пучка в направлении скорости сварки. При этом наблюдается синхронизация колебательного перемещения зоны взаимодействия электронного пучка по передней стенке канала проплавления, образуемого в металле с сигналами в отклоняющих катушках электронной пушки.

В моменты времени, когда электронный пучок максимально отклонен в направлении, обратном скорости сварки, зона взаимодействия пучка с металлом находится вблизи дна канала проплавления. При этом величина сигнала тока несамостоятельного разряда в плазме меньше, чем в моменты времени, когда зона взаи-

модействия пучка с металлом находится в передней верхней области канала проплавления.

На рис. 11 приведены зависимости, полученные при сварке с осцилляцией вдоль стыка недофокусированным и перефокусированным пучком. Можно отметить увеличение амплитуды второй гармоники регистрируемого сигнала при переходе к режимам с перефокусированным электронным пучком. Это свидетельствует о том, что при сварке недофокусированным электронным пучком с осцилляцией в направлении скорости сварки электронный пучок большую часть энергии отдает передней стенке канала проплавления.

На режимах электронно-лучевой сварки с перефокусированным электронным пучком форма канала принимает, по-видимому, более симметричную форму, и электронный пучок одинаково взаимодействует как с передней, так и с задней стенкой канала проплавления.

Выводы:

1. Исследованы закономерности формирования сигнала тока несамостоятельного разряда в плазме при электронно-лучевой

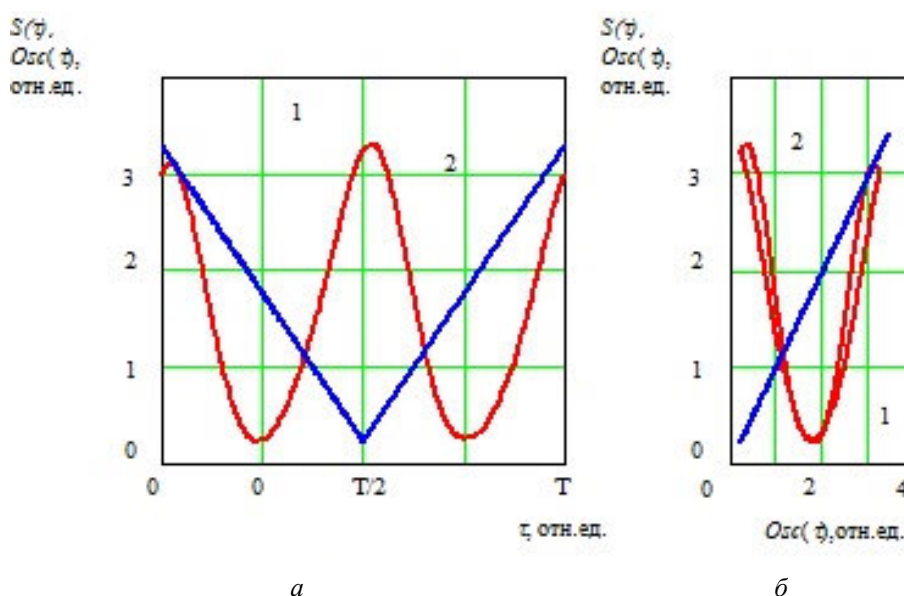


Рис. 9. Результаты обработки сигнала тока несамостоятельного разряда в плазме методом синхронного накопления при сварке с осцилляцией электронного пучка в направлении, перпендикулярном направлению скорости сварки: а – функция $S(\tau)$ (кривая 1) и сигнал тока отклоняющих катушек $Osc(t)$ (кривая 2); б – функция $S(\tau)$ в фазовом пространстве

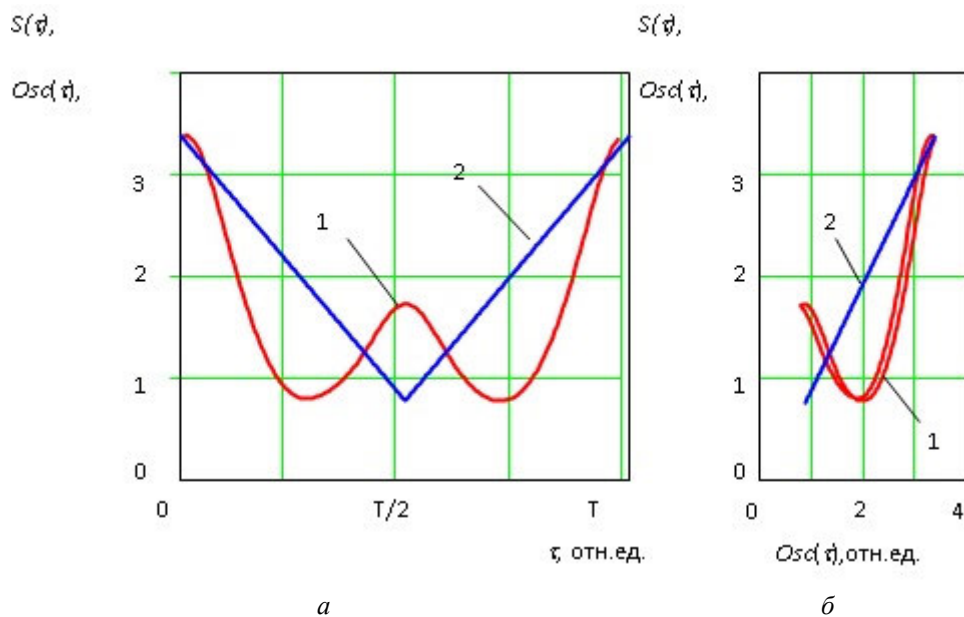


Рис. 10. Результаты обработки сигнала тока несамостоятельного разряда в плазме методом синхронного накопления при сварке с осциллирующей электронного пучка в направлении скорости сварки: а – функция $S(\tau)$ (кривая 1) и сигнал тока отклоняющихся катушек $Osc(t)$ (кривая 2); б – функция $S(\tau)$ в фазовом пространстве

сварке с использованием информационно-измерительной системы с высокоскоростным аналого-цифровым интерфейсом.

2. Анализ компоненты спектра тока несамостоятельного разряда в плазме с частотой порядка 10^4 Гц подтвердил гипотезу о взрывном характере взаимодействия электронного пучка с металлом при электронно-лучевой сварке с глубоким направлением.

3. Впервые исследовано влияние высокочастотной осцилляции электронного пучка с частотой порядка 10^4 Гц по оси, перпендикулярной направлению скорости сварки, на форму канала проплавления и на формирование сигнала тока несамостоятельного разряда в плазме. Установлено, что максимум в спектре регистрируемого сигнала при этом сдвигается по оси частот на величину частоты осцилляции.

4. При высокочастотном воздействии на электронный пучок геометрия канала проплавления при электронно-лучевой сварке практически не изменяется по сравнению со сваркой статическим лучом, т.е. воздействие на столь высоких частотах не приводит к уменьшению

плотности энергии. Это свидетельствует о наличии высокочастотных автоколебательных процессов в канале проплавления и требует учета этого факта при разработке моделей процессов электронно-лучевой сварки и разработке практических рекомендаций для технологических процессов электронно-лучевой сварки с осцилляцией электронного пучка.

5. Предложен механизм процессов в канале проплавления и механизм формирования компоненты спектра тока несамостоятельного разряда в плазме частотой порядка 10^2 Гц при электронно-лучевой сварке с осцилляцией электронного пучка в направлении, перпендикулярном направлению скорости сварки, с небольшой амплитудой и частотами порядка сотен Герц. В процессе сварки происходит стохастическое перемещение зоны взаимодействия электронного пучка с металлом по глубине канала проплавления, и регистрируемый сигнал максимален при взаимодействии пучка с верхними областями канала проплавления. При таком воздействии наблюдаются резонансные явления, происходит регуляризация указанного автоколебательного про-

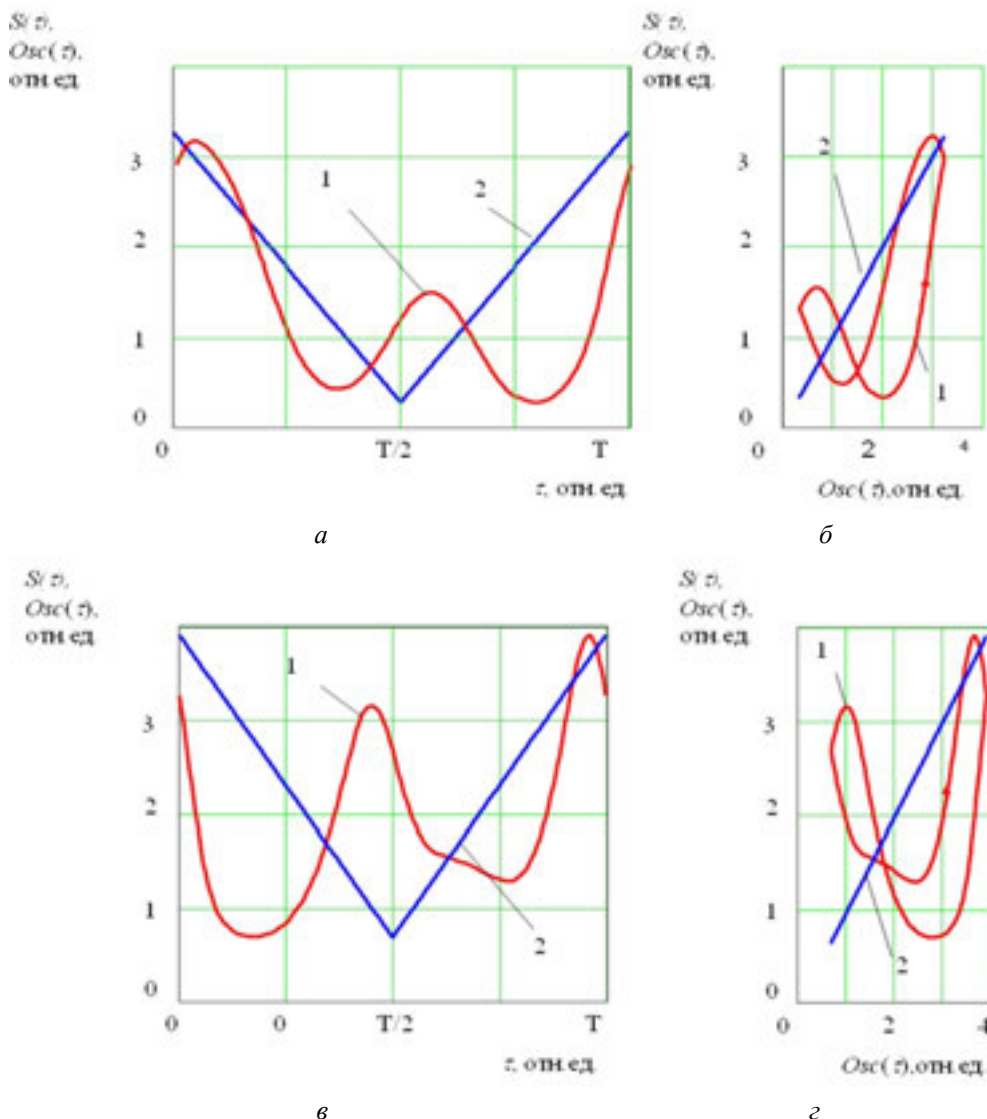


Рис. 11. Результаты обработки сигнала тока несамостоятельного разряда в плазме методом синхронного накопления при сварке с осцилляцией электронного пучка вдоль стыка при различной фокусировке электронного пучка:
 а, в – функция $S(\tau)$ (кривая 1) и сигнал тока отклоняющих катушек $Osc(t)$ (кривая 2); б, г – функция $S(\tau)$ в фазовом пространстве;
 а, б – недофокусированный электронный пучок ($\Delta I_f = -15 \text{ mA}$);
 в, г – перефокусированный электронный пучок ($\Delta I_f = 10 \text{ mA}$)

цесса, а в спектре регистрируемого сигнала появляется максимум на частоте, кратной частоте осцилляции. При сварке с осцилляцией вдоль направления скорости сварки в спектре регистрируемого сигнала появляются две характерные компоненты – на частоте осцилляции и на удвоенной частоте.

Соотношение между амплитудами гармоник зависит от режима фокусировки. Это имеет важное практическое значение и открывает возможность создания быстродействующей системы контроля режима фокусировки электронного пучка при электронно-лучевой сварке.

Библиографический список

1. Башенко В.В., Мауэр К.-О. Импульсный характер потоков заряженных частиц из канала при электронно-лучевой сварке. // Автоматическая сварка. – 1982. – № 3. – С. 62–64.
2. Бельский В.Я., Трушников Д.Н., Шварев А.В. Некоторые аспекты контроля процесса формирования сварного шва при электронно-лучевой сварке со сквозным проплавлением // Сварка и диагностика. –

2010. – № 1. – С. 41–43.
3. *Беленький В.Я., Язовских В.М.* Контроль электронно-лучевой сварки с использованием плазменных явлений в области сварочной ванны // Сварочное производство. – 1997. – № 1. – С. 7–9.
 4. *Зуев И.В.* Обработка материалов концентрированными потоками энергии. – М.: изд-во МЭИ, 1998. – 162 с.
 5. *Зуев И.В., Рыкалин Н.Н., Углов А.А.* Основы электронно-лучевой обработки материалов – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
 6. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / *Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора.* – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
 7. *Миткевич Е.А., Локишин В.Е.* Динамика формирования канала в условиях электронно-лучевой сварки // Автоматическая сварка. – 1980. – № 9. – С. 26–27.
 8. *Назаренко О.К., Кайдалов А.А.* Электронно-лучевая сварка. – Киев: Наук. думка, 1987. – 256 с.
 9. *Патон Б.Е., Лесков Г.И., Нестеренков В.М.* Динамические модели каналов проплавления при электронно-лучевой сварке // Автоматическая сварка. – 1988. – № 1. – С. 1–6.
 10. Получение бездефектных швов при электронно-лучевой сварке / *В.Я. Беленький, В.М. Язовских, Л.Н. Кротов, Д.Н. Трушников* // Наука – производству. – 2000. – № 5. – С. 42.
 11. *Трушников Д.Н.* Применение вейвлет-анализа сигналов вторичного тока для исследования и контроля электронно-лучевой сварки // Сварочное производство. – 2012. – № 4. – С. 15–21.
 12. *Трушников Д.Н., Беленький В.Я.* Исследование формирования сигнала вторичного тока в плазме при электронно-лучевой сварке с осцилляцией электронного пучка // Сварочное производство. – 2012. – № 11. – С. 9–13.
 13. *Трушников Д.Н., Беленький В.Я., Зыков В.В.* Вторично-эмиссионный сигнал из зоны электронно-лучевой сварки и его связь с геометрическими параметрами сварного шва // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 2. – С. 214–221.
 14. *Углов А.А., Селищев С.В.* Автоколебательные процессы при воздействии концентрированных потоков энергии. – М.: Наука, 1987. – 149с.
 15. *Krinberg I.A., Mladenov G.M.* Formation and expansion of the plasma column under electron beam metal interaction // Vacuum. – 2005. – Vol. 77. – P. 407–411.
 16. *Trushnikov D.N., Belenkiy V.Ya., Portnov N.S.* Secondary – Emission signal for weld formation monitoring and control in electron beam welding (EBW) // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. – 2012. – Vol. 43. – Is. 10. – P. 892–897.
 17. *Yazovskikh V.M., Trushnikov D.N., Belen'kii V.Y.* The mechanism of secondary emission processes in electron beam welding with the modulation of the electron beam // Welding International. – 2004. – Vol. 8. – № 9. – P. 724–729.

THE STUDY OF INTERACTION PROCESSES OF CONCENTRATED ELECTRON BEAM WITH METAL AT ELECTRON BEAM WELDING

V.Y. Belen'kii, D.N. Trushnikov

Research of oscillation spectrum parameters of non-independent charge current which is formed in plasma in the zone of electron beam welding by the powerful concentrated electron beam is presented. Fluctuations of non-independent charge current are investigated at an oscillation electron beam in various frequency ranges, using a synchronous accumulation method as well.

Keywords: electron beam, electron beam welding, keyhole, electron beam oscillation, non-independent charge in plasma.

Сведения об авторах

Беленький Владимир Яковлевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: VladimirBelenkij@yandex.ru

Трушников Дмитрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной физики, ПНИПУ; e-mail: trdimitr@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 25.06.2013 г.