

**А.Л. Пискунов, А.Н. Лялин, В.Е. Щавлев, А.А. Абдуллин**

**A.L. Piskunov, A.N. Lyalin, V.E. Schavlev, A.A. Abdullin**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
Perm National Research Polytechnic University

**ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ  
И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ФОРМИРОВАНИЯ ШВА  
ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ**

**REVIEW OF RESULTS OF SECONDARY-EMISSION SIGNAL  
USE FOR THE WELD FORMATION MONITORING  
AND CONTROL IN ELECTRON BEAM WELDING**

Проведен обзор результатов исследования процессов, сопутствующих электронно-лучевой сварке с высокой концентрацией мощности электронного пучка, с целью их использования для оперативного контроля и управления процессом формирования сварного шва.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая сварка, электронный пучок, электронная эмиссия, вторично-эмиссионный сигнал, контроль проплавления.

In work the research results of the processes at electron beam welding with high power density are reviewed. The use of secondary emission signals for operative control of weld formation is highlighted, too.

**Keywords:** electron beam welding, electron beam, electron emission, secondary emission signal, weld formation control.

Электронно-лучевая сварка является высокоэффективным технологическим процессом, позволяющим получать сварные соединения с высокими эксплуатационными характеристиками. Для решения задач, связанных с совершенствованием технологий электронно-лучевой сварки и обеспечением воспроизводимости получаемых соединений, традиционно существовало два подхода. Первый основан на совершенствовании установок и источников для электронно-лучевой сварки и стабилизации всех технологических параметров. Второй подход основан на изучении процессов взаимодействия электронного пучка с металлом и оперативном контроле и управлении процессом

формирования сварного шва по параметрам вторичных излучений из зоны сварки, таких как вторичная электронная и ионная эмиссия, рентгеновское излучение и др. [1–17]. Важное место занимает моделирование [18–20].

На определенном этапе первый подход имел превалирующее значение. Источники для электронно-лучевой сварки совершенствовались очень быстро и позволяли решать все более сложные технологические проблемы. В настоящее время качество и российских и зарубежных источников приблизилось к своему максимуму, тем не менее описанные проблемы получения бездефектных сварных швов не исчезли. Было установлено, что большинство дефектов, сопутствующих электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением, являются неотъемлемым свойством процесса, и стабилизация всех параметров энергетического воздействия недостаточна. Это свидетельствует о том, что разработка бездефектных технологий требует глубокого изучения природы процессов, протекающих при взаимодействии мощного концентрированного электронного пучка с металлом при сварке, и поиска эффективных методов оперативного контроля процесса формирования сварного шва при электронно-лучевой сварке.

Получили известность работы по исследованию связи рентгеновского излучения с технологическими параметрами электронно-лучевой сварки [9–10]. Несмотря на несомненные успехи, использование результатов этих исследований в ряде случаев затруднено в связи с трудоемкостью методов и трудностью применения их для сталей, как материалов, интенсивно поглощающих рентгеновское излучение. Кроме того, рентгеновские методы обладают инерционностью, что затрудняет их использование для изучения высокочастотных процессов в канале проплавления [21–22].

Более простыми и быстродействующими являются методы, основанные на измерении параметров электронных и ионных токов, протекающих в цепи электрода, расположенного над зоной сварки [23–25]. Исследования в этом направлении интенсивно велись в 80–90-е гг. прошлого столетия. Получила известность работа [26], в которой автор сделал попытку окончательно решить все вопросы, связанные с использованием вторично-эмиссионных методов для управления процессом. В исследовании применялась одновременная запись сигналов вторичного тока, токов луча, токов отклоняющих катушек и т.д. на магнитные ленты. Далее, после сопоставления полученных сигналов с профилем продольных шлифов полученных сварных швов, был сделан вывод о неприменимости данных сигналов для управления процессом электронно-лучевой сварки. Данная работа обладает рядом недостатков. Во-первых, при измерениях вторичных сигналов применялся заземленный коллектор (электрод). Сигнал такого коллектора обладает сложным составом. Такой коллектор регистрирует одновременно потоки положительных и отрицательных ионов, термоэлектронов, отраженных и вторичных электронов.

Результирующий сигнал описывает сумму отдельных токов и зачастую малоинформативен. Во-вторых, исследовалось поведение только низкочастотных составляющих (порядка нескольких герц – десятков герц). Недостаток обусловлен ограничениями применяемой техники и некоторой прямолинейностью подхода. Существенным недостатком является и то, что, по сути, в работе [26] искалась прямая зависимость между параметрами проплавления и колебаниями вторичного сигнала.

**Формирование тока несамостоятельного разряда в плазме, образующейся в зоне электронно-лучевой сварки.** Одним из характерных явлений, сопутствующих взаимодействию концентрированного электронного пучка с металлом при электронно-лучевой сварке, является образование плазмы в зоне воздействия пучка [4–6]. Сигнал тока в плазме (обусловленный термоэлектронной эмиссией) оказался во многом более информативным по сравнению с сигналами, формируемыми другими вторичными процессами в зоне сварки. При этом параметры процессов, протекающих в плазме, тесно связаны с характеристиками термического воздействия электронного пучка на свариваемый металл, что открывает возможности осуществления оперативного контроля за процессом электронно-лучевой сварки [4–8]. В данной работе обобщен опыт авторов в области исследования процессов, сопутствующих электронно-лучевой сварке, и в области оперативного контроля и управления процессом формирования сварного шва по параметрам указанного сигнала.

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, покидающих зону сварки, плазма обеспечивает прохождение значительного по величине тока, направленного от свариваемого изделия к близлежащим элементам технологической вакуумной камеры или устанавливаемому над зоной сварки коллектору заряженных частиц.

Обусловленный этими процессами несамостоятельный разряд 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;
- стимулирует генерацию низкотемпературной плазмы в зоне разряда путем ионизации паров металла;
- инициирует интенсивную электронную эмиссию с поверхности конденсированной фазы металла, обеспечивая значительную величину тока в плазме.

Для отбора тока из плазмы может быть использован коллектор электронов, устанавливаемый над зоной сварки (рис. 1).

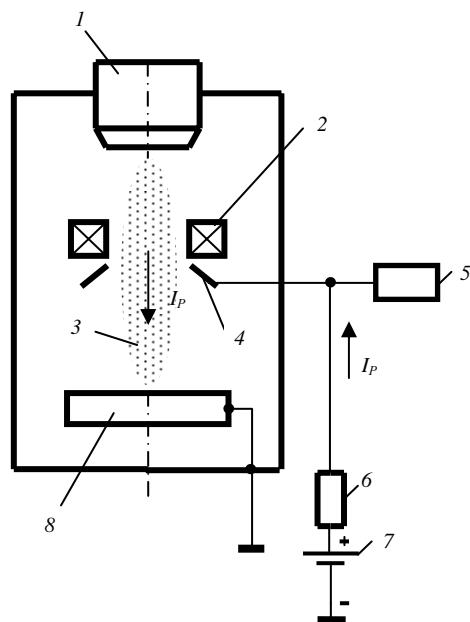


Рис. 1. Схема регистрации тока несамостоятельного разряда в плазме, образующейся над зоной электронно-лучевой сварки: 1 – электронная пушка; 2 – фокусирующая линза; 3 – плазма, образующаяся над зоной электронно-лучевой сварки; 4 – коллектор электронов; 5 – система регистрации; 6 – резистор нагрузки;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

**Контроль формирования сварного шва по параметрам тока несамостоятельного разряда в плазме при электронно-лучевой сварке.** Ток несамостоятельного разряда в плазме протекает и в цепи свариваемого изделия, являющейся участком внешней цепи разряда, навстречу току электронного пучка. Как известно, при электронно-лучевой сварке мощным концентрированным электронным пучком в свариваемом металле образуется узкий и глубокий канал проплавления. В канале проплавления протекают сложные физические процессы. Анализ спектра тока несамостоятельного разряда в плазме при электронно-лучевой сварке мощным электронным пучком показал наличие в спектре составляющих с частотами в диапазонах 200–1000 Гц и 10–50 кГц [27–30], связанных с колебательными процессами, протекающими в канале проплавления [22].

Исследования [27–30] показали, что процессы в канале проплавления имеют в значительной степени регулярную высокочастотную составляющую (частота около 15 кГц). В спектре Фурье наблюдается отчетливый максимум на этой частоте (рис. 2). Данная высокочастотная область спектра до этого в исследованиях других научных коллективов игнорировалась и считалась неинформативной. Изучение осциллограмм показало, что появление в спектре

ре этой составляющей обусловлено наличием в сигнале резких пиков (импульсов), следующих на некоторых режимах друг за другом практически регулярно. Эти импульсы имеют стохастически изменяющуюся амплитуду и следуют друг за другом сериями, через случайные промежутки времени между сериями (рис. 3). При этом импульсы тока имеют значительную величину (до 1 А). Подобный характер осциллограмм и спектрограмм наблюдался практически при всех режимах сварки с глубоким проплавлением мощностью от 2 кВт для всех исследованных материалов и на нескольких электронно-лучевых установках (в том числе на установках, в состав которых не входят инверторные источники питания). Измерения ускоряющего напряжения, колебаний тока пучка электронов с помощью стандартной чаши Фарадея и т.д. показало, что указанные колебания не имеют отношения к сигналам, генерируемым энергетическим агрегатом электронно-лучевой установки и, таким образом, отражают колебания в системе луч – канал проплавления – плазма.

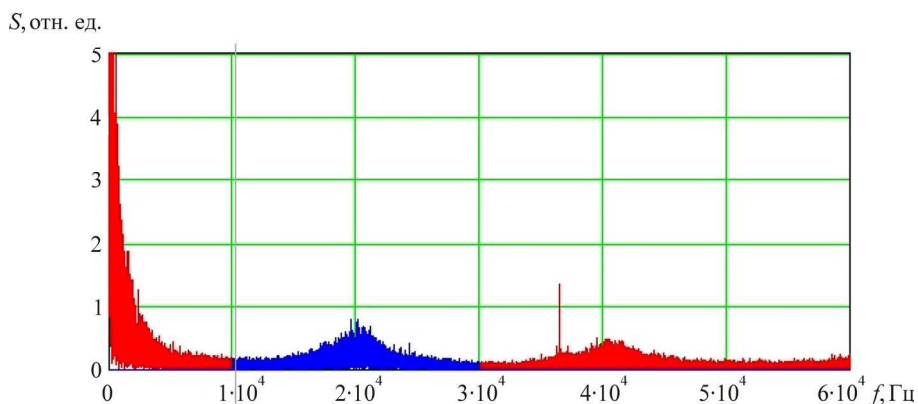


Рис. 2. Спектрограмма вторично-эмиссионного сигнала, полученного при сварке инверторным источником ЭЛА-60/15

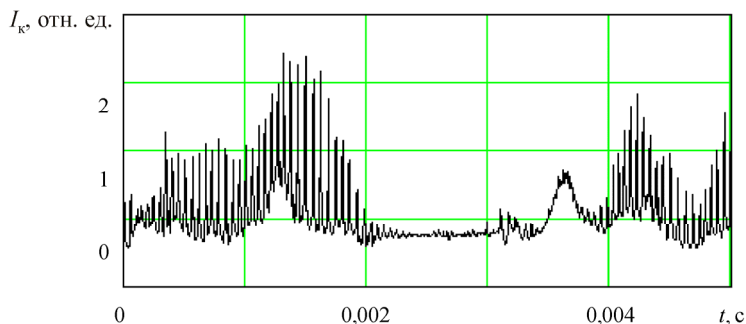


Рис. 3. Типичная осциллограмма вторичного тока плазмы при ЭЛС

Формирование в системе электронный пучок – канал проплавления – плазма указанных высокочастотных процессов было рассмотрено в работах [12–15, 21–22], в которых предложен следующий механизм их возникновения. Нагрев металла концентрированным электронным пучком обеспечивает значительный перегрев поверхностного слоя металла в канале проплавления, при этом величина перегрева определяется скоростью нарастания температуры. Оценка скорости нарастания температуры при плотности мощности электронного пучка  $10^9$ – $10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup> дает значения  $10^7$ – $10^8$  К/с. При таких скоростях нарастания температуры в металле создаются условия, близкие к реализации фазового взрыва металла в метастабильной области температур. 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 [7, 8]. В соответствии с этим регистрируемая в спектре колебаний тока несамостоятельного разряда в плазме составляющая с частотой в диапазоне 10–50 кГц связана со взрывным характером процесса взаимодействия электронного пучка с передней стенкой канала проплавления при сварке.

Оценка плотности тока термоэлектронной эмиссии по уравнению Ричардсона показывает, что при температуре кипения железа ток эмиссии при площади пятна нагрева 1 мм<sup>2</sup> составляет около 1 А, а при перегреве металла на 1000 °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.

Промежуток «свариваемое изделие – электрод, осуществляющий отбор тока из плазмы» может быть рассмотрен в качестве нелинейного активного двухполюсника в цепи регистрации тока несамостоятельного разряда в плазме, а внешние источники электродвижущей силы – как факторы, изменяющие распределение потенциала в слоях пространственного заряда, отделяющих плазму от соприкасающихся с ней электродов, и определяющие условия прохождения тока в плазме. Тогда импульсы тока несамостоятельного разряда в плазме с частотой в диапазоне 10–50 кГц в нагрузке измерительной цепи могут рассматриваться как импульсы термоэлектродвижущей силы, генерируемой при тепловом взрыве металла в зоне воздействия электронного пучка. Энергия этих импульсов пропорциональна тепловой энергии, выделяемой продуктами разрушения металла, что позволяет осуществлять контроль мощности, вводимой электронным пучком в металл при электронно-лучевой сварке [28–36].

Составляющая спектра тока несамостоятельного разряда в плазме с частотой в диапазоне 10–50 кГц представляет значительный интерес для разработки методов оперативного контроля процесса электронно-лучевой сварки, так как ее параметры коррелируют с величиной удельной мощности электронного пучка. На рис. 4 приведена зависимость амплитуды высокочастотной составляющей тока в плазме от тока фокусировки электронного пучка и получаемые на этих режимах поперечные сечения зон проплавления при электронно-лучевой сварке хромоникелевой стали (мощность 3 кВт).

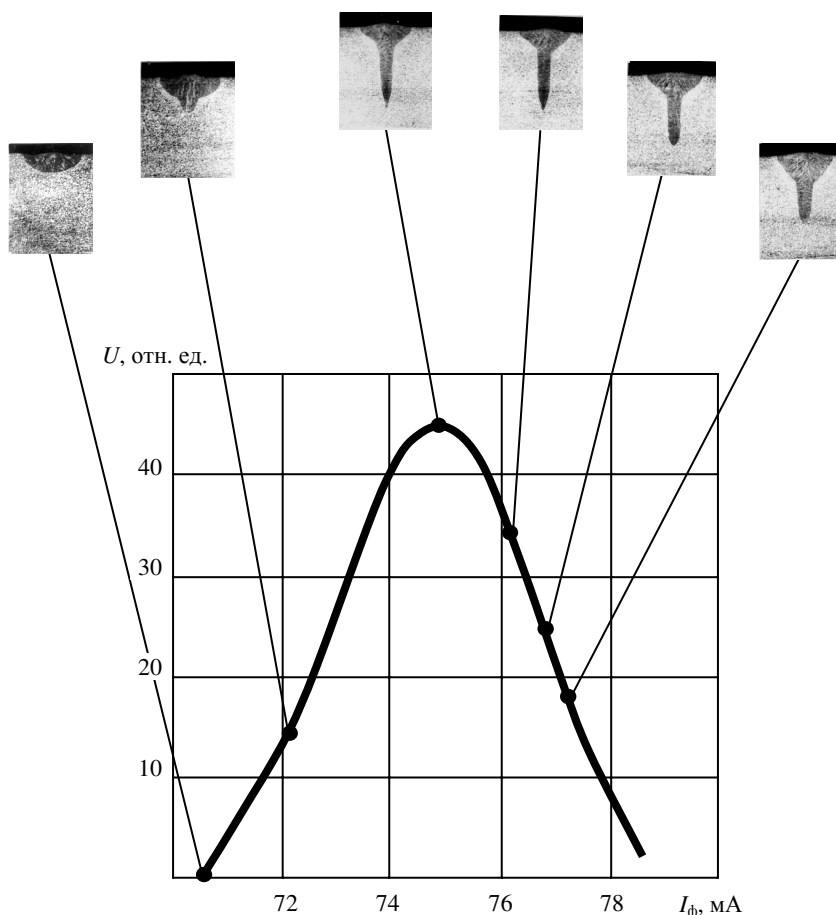


Рис. 4. Поперечные сечения зон проплавления при различных режимах фокусировки электронного пучка и соответствующие им амплитуды составляющей спектра колебаний тока несамостоятельного разряда в диапазоне 3–50 кГц (по данным работы [10])

В работах [11, 31] показано, что при введении периодических воздействий на электронный пучок (модуляции тока пучка или его осцилляция) происходит упорядочивание колебаний в канале проплавления и серии импуль-

сов начинают следовать с определенной частотой, кратной частоте колебаний. Эти исследования обладают рядом недостатков и требуют продолжения. В частности, не проводилась одновременная запись сигналов в отклоняющих катушках и сигналов вторичного тока в плазме, а осцилляция осуществлялась по достаточно сложной траектории, что затрудняло анализ. В исследованиях [37–41] отмечено положительное влияние осцилляции (или модуляции электронного пучка) на качество формирования сварного шва. Была установлена возможность определения оптимальных частот воздействия по параметрам вторичного тока в плазме.

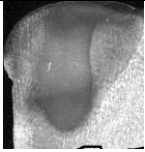
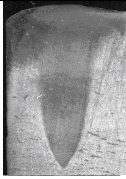
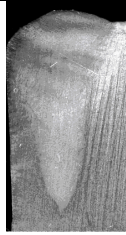
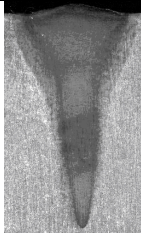



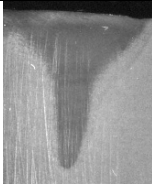
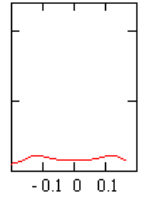
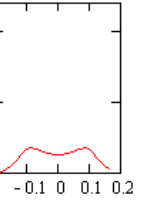
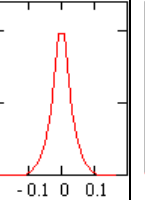
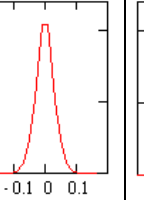
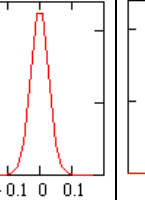
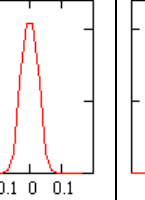
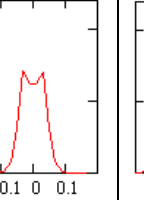
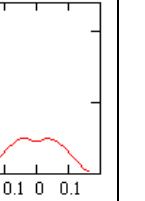
При электронно-лучевой сварке со сквозным проплавлением ток в плазме формируется и со стороны нижней поверхности свариваемого изделия, что позволяет осуществлять контроль формирования обратного валика сварного шва по параметрам составляющей тока в плазме с частотой в диапазоне 10–50 кГц. При этом, в отличие от известных способов, основанных на регистрации сквозного тока при прохождении электронного пучка сквозь металл и обеспечивающих формирование так называемого ниточного проплава, удастся сформировать качественный обратный валик сварного шва за счет применения коллектора определенной формы, контролирующего электронный ток в плазме (а не сквозной ток сварочного электронного пучка), и увеличения величины сквозного тока электронного пучка.

Исследования показали возможность контроля процесса электронно-лучевой сварки со сквозным проплавлением по параметрам тока несамостоятельного разряда над свариваемым изделием [11]. Установлено, что появление сквозного проплавления сопровождается снижением амплитуды колебаний тока несамостоятельного разряда с частотами в диапазонах 200–1000 Гц и 2,5–50,0 кГц, а также амплитуды на частоте, кратной частоте осцилляции. Величина, на которую снижаются амплитуды указанных колебаний, повышается при электронно-лучевой сварке с осцилляцией электронного пучка.

Последние исследования [33] показали возможность постановки и решения обратной задачи реконструкции формы проплавления при электронно-лучевой сварке по параметрам сигнала вторичного тока в плазме, регистрируемого в цепи кольцевого электрода, находящегося над областью сварки. При обработке из сигнала вторичного тока в плазме выделялась высокочастотная составляющая в диапазоне от 10 до 30 кГц. Далее исследовались параметры выделенной составляющей. Оказалось, параметры эмпирической плотности сигнала составляющей несут информацию об удельной мощности (режиме фокусировки в процессе сварки), а формы кривых плотностей распределения отражают форму проплавления при электронно-лучевой сварке (таблица).



Поперечные шлифы и эмпирические ненормированные плотности распределения выделенного сигнала в амплитудном диапазоне при сварке стали статичным пучком мощностью 9 кВт при различных режимах фокусировки

Ток фокусировки, мА	715	720	725	730	735	740	745	750
Поперечные шлифы								
Глубина шва, мм	10	14	16	17	21	19	17	13
Ширина шва в верхней части, мм	10	9	8	9	9	9	10	12
Эмпирические ненормированные плотности распределения								
Модальное значение, отн. ед.	1,089	1,835	9,777	10,425	10,672	10,386	7,115	2,535
Средне-квадратичное отклонение, отн. ед.	0,11	0,093	0,056	0,053	0,047	0,049	0,058	0,073

Опыт исследования вторично-эмиссионных процессов показывает возможность разработки методов оперативного контроля и управления формированием сварного шва при электронно-лучевой сварке. Наиболее предпочтительным, по мнению авторов, является использование сигнала вторичного тока в плазме. Параметры процессов, протекающих в плазме, тесно связаны с процессами взаимодействия электронного пучка с металлом в канале проплавления, что открывает возможности изучения этих процессов. Также становится возможным оперативный контроль процесса электронно-лучевой сварки (контроль удельной мощности, контроль формирования шва при сквозном проплавлении).

Проведенные исследования показывают наличие в сигнале вторичного тока в плазме высокочастотной составляющей (10–50 кГц). Эта составляющая не связана с колебаниями параметров энергетических агрегатов электронно-лучевых установок и отражает высокочастотные процессы в системе электронный пучок – канал проплавления – плазма. Параметры сигнала именно в этом частотном диапазоне (амплитуда, модальное значение плотности распределения сигнала и т.д.) зачастую несут наиболее полную информацию о процессе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 11-08-96016 и Министерства образования Пермского края.

### **Список литературы**

1. Krinberg I., Mladenov G. Formation and expansion of the plasma column under electron beam-metal interaction Original Research Article // Vacuum. – 2005. – № 77. – P. 407–411.
2. Беленький В.Я., Язовских В.М., Журавлев А.П. О природе вторичного тока в плазме, образующейся в зоне взаимодействия электронного луча при сварке // Физика и химия обработки материалов. – 1983. – № 6. – С. 128–129.
3. Беленький В.Я., Язовских В.М. О некоторых условиях прохождения вторичного тока электронно-лучевой сварки // Физика и химия обработки материалов. – 1984. – № 4. – С. 56–59.
4. Беленький В.Я. О стохастическом характере колебательных процессов при электронно-лучевой сварке // Физика и химия обработки материалов. – 1986. – № 5. – С. 115–118.
5. Беленький В.Я., Язовских В.М. О прохождении вторичного тока при электронно-лучевой сварке // Электронная обработка материалов. – 1996. – № 1. – С. 34–36.

6. Mladenov G., Sabehevski S. Potential distribution and space-charge neutralization in technological intense electron beams // *Vacuum*. – 2001. – № 62. – P. 113.

7. Беленький В.Я. Прибор для развертки электронного луча и контроля его фокусировки при ЭЛС // *Сварочное производство*. – 1988. – № 1. – С. 19.

8. Trushnikov D.N. The use of secondary emission signal for control at EBW // *ELECTROTECHNIKA&ELECTRONIKA*, Special issue: Papers from 10-th International Conference on Electron Beam Technologies – EBT-2012. – 2012. – № 5–6. – С. 103–108.

9. Laptenov V.D., Murygin A.V., Tikhonenko D.V. X-ray sensor for guiding the electron beam on the joint in electron-beam welding // *Welding International*. – 2006. – № 20 (11). – P. 894.

10. Устройство управления фокусировкой и глубиной проплавления по собственному рентгеновскому излучению при ЭЛС с модуляцией уровня фокусировки / В.Я. Браверман, Д.А. Скурихин, С.Г. Баякин, В.Ф. Шабанов, В.В. Башенко // *Сварочное производство*. – 1997. – № 1. – С. 16–19.

11. Механизм вторично-эмиссионных процессов при электронно-лучевой сварке с модуляцией электронного пучка / В.М. Язовских, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький, Л.Н. Кротов // *Сварочное производство*. – 2004. – № 4. – С. 21.

12. Yazovskikh V.M., Trushnikov D.N., Belenkiy V.Ya. The mechanism of secondary emission processes in electron beam welding with the modulation of the electron beam // *Welding International*. – 2004. – Vol. 18, № 9. – P. 724–727.

13. Формирование вторично-эмиссионного сигнала при ЭЛС со сквозным проплавлением / Д.Н. Трушников, В.М. Язовских, Л.Н. Кротов, В.Я. Беленький // *Сварочное производство*. – 2006. – № 11. – С. 22–24.

14. Formation of a secondary-emission signal electron beam welding with continuous penetration / D.N. Trushnikov, V.M. Yazovskikh, L.N. Krotov, V.Ya. Belenkiy // *Welding International*. – 2007. – Vol. 21, № 5. – P. 384–386.

15. Трушников Д.Н. Применение вейвлет-анализа сигналов вторичного тока для исследования и контроля электронно-лучевой сварки // *Сварочное производство*. – 2012. – № 4. – С. 15–21.

16. Беленький В.Я., Язовских В.М. О прохождении вторичного тока при электронно-лучевой сварке // *Электронная обработка материалов*. – 1986. – № 1. – С. 34–36.

17. Использование параметров вторично-эмиссионного сигнала для управления проплавления при электронно-лучевой сварке / Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький, В.Е. Щавлев, А.Л. Пискунов, А.Н. Лялин // *Интеллектуальные системы в производстве*. – 2012. – № 1. – С. 175–181.

18. Динамическая модель электронно-лучевой сварке со сквозным проплавлением / В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников, А.Л. Пискунов, А.Н. Лялин // Вестник ПГТУ. Машиностроение, материаловедение. – Пермь, 2011. – Т. 13, № 3. – С. 72–84.

19. Язовских В.М., Беленький В.Я., Трушников Д.Н. Построение математических моделей сварки цилиндрических тел // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – Пермь, 2012. – Т. 14, № 1. – С. 5–17.

20. Математическое моделирование сварочных процессов в пакете FEMLAB 3.0 / Р.А. Мусин, Д.Н. Трушников, В.А. Шкурихин, Ю.А. Путин // Вестник ПГТУ. Машиностроение, материаловедение. – Пермь, 2010. – Т. 12, № 4. – С. 7–16.

21. Зуев И.В., Рыкалин Н.Н., Углов А.А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1978. – С. 239.

22. Зуев И.В., Рыкалин Н.Н., Углов А.А. Оценка критической удельной мощности электронно-лучевой сварки металлов с кинжальным проплавлением // Физика и химия обработки материалов. – 1970. – № 3. – С. 3–7.

23. А. с. № 2024372 МКИ В 23 К 15/00. Способ электронно-лучевой сварки и устройство для его осуществления / В.М. Язовских, В.Я. Беленький, Н.В. Кабаев, А.А. Углов, И.В. Зуев. – 15.12.1994.

24. Язовских В.М., Беленький В.Я. Влияние тока луча на его фокусировку при электронно-лучевой сварке // Сварочное производство. – № 10. – С. 34–35.

25. Belenkiy V.Ya., Yazovskikh V.M. Control of electron beam welding using plasma phenomena in the molten pool region // Welding International. – 1997. – Vol. 11, № 7. – С. 554–556.

26. Ланкин Ю.Н. Экспериментальное исследование эмиссии заряженных частиц и теплового излучения как параметров автоматического регулирования процесса электронно-лучевой сварки. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР, 1982. – С. 32.

27. Амплитуда колебаний вторичного тока при электронно-лучевой сварке / В.В. Степанов, В.Я. Беленький, В.М. Язовских, А.П. Журавлев // Сварочное производство. – 1982. – № 4. – С. 8–11.

28. Структура вторично-эмиссионного сигнала при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением / Д.Н. Трушников, В.М. Язовских, В.Я. Беленький, Л.Н. Кротов // Сварка и диагностика. – 2008. – № 4. – С. 22–24.

29. Беленький В.Я. Об эмиссии из области соударения концентрированного электронного пучка с металлом при сварке // Физика и химия обработки материалов. – 1986. – № 3. – С. 14–17.

30. Некоторые аспекты реализации вторично-эмиссионного контроля при электронно-лучевой сварке / В.Я. Беленький, В.М. Язовских, В.А. Смирнов, А.П. Журавлев // Электронная обработка материалов. – 1985. – № 8. – С. 48–51.

31. 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.
32. Беленький В.Я., Трушников Д.Н., Шварев А.В. Некоторые аспекты контроля процесса формирования сварного шва электронно-лучевой сварке со сквозным проплавлением // Сварка и диагностика. – 2010. – № 1. – С. 41–43.
33. 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.
34. Пат. 2148484 Российская Федерация. Способ электронно-лучевой сварки / Язовских В.М., Беленький В.Я., Кротов Л.Н. – 10.05.2000.
35. Пат. 2183153 Российская Федерация. Способ электронно-лучевой сварки / Язовских В.М., Беленький В.Я., Кротов Л.Н., Трушников Д.Н. – 10.06.2002.
36. Пат. 2237557 Российская Федерация. Способ электронно-лучевой сварки / Язовских В.М., Трушников Д.Н., Беленький В.Я., Аржакин А.Н., Столяров И.И., Кротов Л.Н. – 10.06.2004.
37. Model-based approach for investigation of electron beam welding of high-strength steel / E. Koleva, G. Mladenov, D.N. Trushnikov, V.Ya. Belenkiy // ELECTROTECHNIKA&ELECTRONIKA, Special issue: Papers from 10-th International Conference on Electron Beam Technologies – EBT-2012. – 2012. – № 5–6. – С. 115–118.
38. Experimental investigation of the weld cross section at electron beam welding of high-strength steel / D.N. Trushnikov, E. Koleva, V.Ya. Belenkiy, G. Mladenov // ELECTROTECHNIKA&ELECTRONIKA, Special issue: Papers from 10-th International Conference on Electron Beam Technologies – EBT-2012. – 2012. – № 5–6. – С. 108–115.
39. Trushnikov D.N., Belenkiy V.Ya. Development of a non-defect technology at electron beam welding // ELECTROTECHNIKA&ELECTRONIKA, Special issue: Papers from 10-th International Conference on Electron Beam Technologies – EBT-2012. – 2012. – № 5–6. – С. 99–103.
40. Беленький В.Я. Развертка электронного пучка по X-образной траектории как средство уменьшения дефектов в корне шва при электронно-лучевой сварке // Автоматическая сварка. – 1986. – № 9. – С. 35–37.
41. Особенности получения качественных сварных швов при электронно-лучевой сварке высокопрочных сталей большой толщины / В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников, Г.М. Младенов, Т.В. Ольшанская // Автоматическая сварка. – 2012. – № 2. – С. 47–50.

Получено 3.09.2012

**Пискунов Анатолий Леонидович** – аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: pal-2010@yandex.ru).

**Лялин Алексей Николаевич** – аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ale86403793@yandex.ru).

**Щавлев Валерий Евгеньевич** – аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: valscv@gmail.com).

**Абдуллин Александр Альбертович** – аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: aaa130988@mail.ru).

**Piskunov Anatoly Leonidovich** – Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: pal-2010@yandex.ru).

**Lyalin Alexey Nikolaevich** – Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: ale86403793@yandex.ru).

**Shyavlev Valeriy Evgenyevich** – Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: valscv@gmail.com).

**Abdullin Alexandr Albertovich** – Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: aaa130988@mail.ru).