

УДК 621.791.72

В.Я. Браверман, В.С. Белозерцев

V.Ya. Braverman, V.S. Belozertsev

Сибирский государственный аэрокосмический университет
им. академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск

Siberian State Aerospace University
named after Academician M. Reshetnev, Krasnoyarsk

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ РЕНТГЕНОВСКОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ПОЛОЖЕНИЯ ЛУЧА ОТНОСИТЕЛЬНО СТЫКА
ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ**

**RESEARCH OF THE RELATION BETWEEN X-RAY RADIATION
AND ELECTRON BEAM POSITION RELATIVE TO THE JOINT
DURING THE ELECTRON BEAM WELDING**

Приведено описание и результаты некоторых экспериментов по изучению рентгеновского излучения, возникающего при электронно-лучевой сварке. Исследования проведены с целью определения взаимосвязи излучения с процессом формирования сварного шва и использования излучения для управления сваркой.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, электронно-лучевая пушка, рентгеновское излучение, положение луча относительно стыка, датчик рентгеновского излучения.

We provide a description and results of several experiments designed to study X-ray radiation occurring during electron beam welding. This research is conducted to determine interrelation between X-ray radiation and the welding seam formation process. We also examine how to utilize the radiation in welding control.

Keywords: electron beam welding, electron beam gun, X-rays, position of the beam relative to the joint, X-ray sensor.

Возможность применения рентгеновского излучения (РИ) для получения информации о состоянии процесса электронно-лучевой сварки (ЭЛС) основывается на знании физических законов возникновения РИ и взаимодействия его с веществом. Аналитическое описание названных закономерностей затруднено главным образом из-за отсутствия достоверных сведений о физических процессах, происходящих в канале проплавления. Это свидетельству-

ет о целесообразности проведения экспериментальных исследований с целью разработки рентгеновских систем управления ЭЛС.

Информацию о положении электронного луча относительно стыка свариваемых деталей в процессе ЭЛС можно получить как из канала проплавления, так и в непосредственной близости от него. Последнее может быть реализовано, например, кратковременным выводом луча из канала, осуществлением измерительных операций и возвращением луча в зону сварки. Очевидно, время вывода должно быть таким, чтобы не произошло заметных изменений в сварочной ванне, а скорость перемещения луча должна обеспечить ввод энергии, недостаточной для оплавления кромок стыка. В связи с этим рассматривается возможность получения информации при отсутствии оплавления кромок стыка и в случае, когда сварочный электронный луч находится в канале проплавления. Названные ситуации существенно влияют на аппаратный состав сварочного оборудования и в значительной степени определяют технологию ЭЛС. Представляется целесообразным рассмотреть именно таких ситуаций.

Исследования проведены на электронно-лучевой установке ЭЛУ-9Б с энергокомплексом ЭЛА 60/60 ($U_{\text{уск}} = 60 \text{ кВ}$). С помощью манипулятора образец перемещался относительно электронного луча поперек стыка (рис. 1).

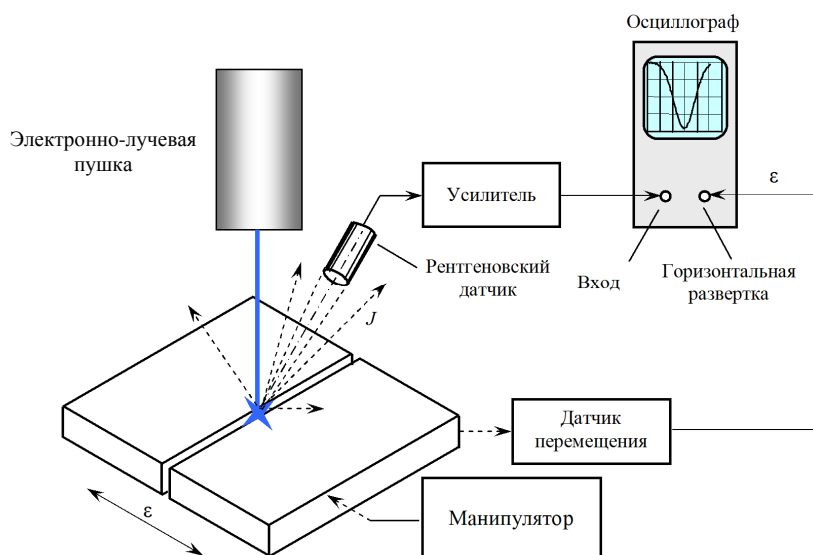


Рис. 1. Эксперимент по определению зависимости рентгеновского излучения от положения луча относительно стыка

В качестве рентгеновского датчика использован блок детектирования стинцилляционный БДС-6, в состав которого входят чувствительный кри-

сталл на основе NaJ(Tl), фотоумножитель ФЭУ-85, источник питания для ФЭУ, усилительное устройство и источник питания для него. При обработке результатов относительные величины по оси ординат получены путем деления текущих значений интенсивности рентгеновского излучения $J(\varepsilon)$ на величину, соответствующую интенсивности излучения J_M , возникающего на чистом металле при данном токе луча¹ [1].

Исследования проведены в двух режимах: при отсутствии оплавления кромок и при сварке. В сварочном режиме дополнительно осуществлялось перемещение образцов в направлении сварки, а поперечное перемещение производилось многократно в разных направлениях.

При отсутствии оплавления ось датчика совмещалась с точкой падения луча на поверхность образцов (см. рис. 1). При сварке излучение регистрировалось через коллиматор, ограничивающий угол обзора датчика (рис. 2). Это необходимо для исключения попадания на датчик излучения с поверхности расплава (излучение регистрируется из зазора в стыке).

Эксперименты показали, что зависимости интенсивности рентгеновского излучения от положения луча относительно стыка носят экстремальный характер, причем при отсутствии оплавления кромок характер экстремума – минимум (рис. 3), а при сварке – максимум (рис. 4).

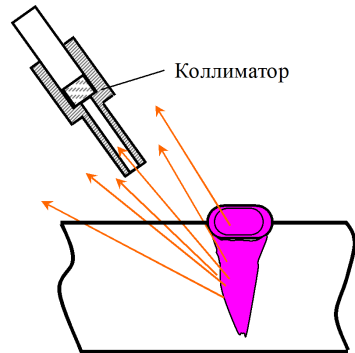


Рис. 2. Регистрация рентгеновского излучения, проникающего через зазор в стыке коллимированным датчиком

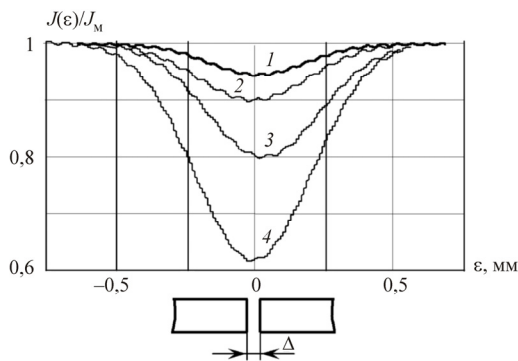


Рис. 3. Зависимость интенсивности рентгеновского излучения от положения луча относительно стыка: материал АМг-6; $U_{\text{снк}} = 60$ кВ; $I_{\text{л}} = 1$ мА; 1 – $\Delta = 0,01$ мм; 2 – $\Delta = 0,05$ мм; 3 – $\Delta = 0,1$ мм; 4 – $\Delta = 0,2$ мм

¹ Хараджа Ф.Н. Общий курс рентгенотехники. М.: Энергия, 1966. 568 с.

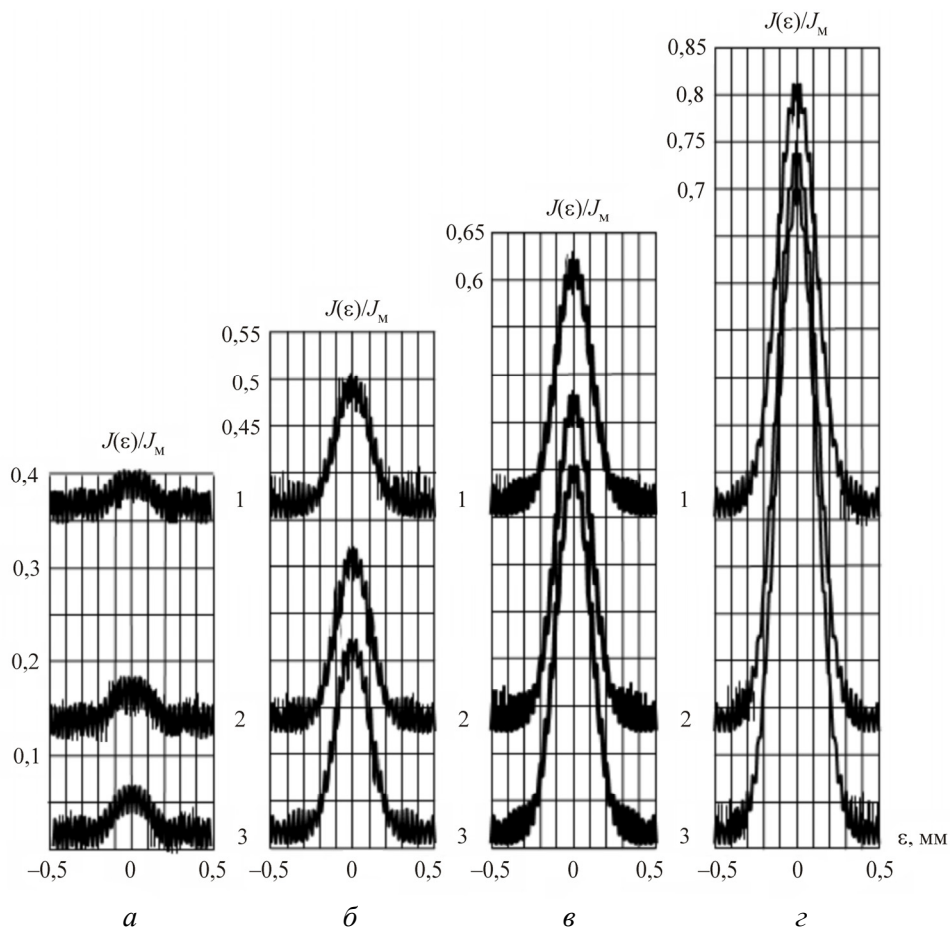


Рис. 4. Зависимость интенсивности рентгеновского излучения от положения луча относительно стыка: *a* – $\Delta = 0,01$ мм; *б* – $\Delta = 0,05$ мм; *в* – $\Delta = 0,1$ мм; *г* – $\Delta = 0,2$ мм; 1 – $h = 5$ мм; 2 – $h = 10$ мм; 3 – $h = 25$ мм; h – глубина проплавления; материал АМг-6; $U_{\text{уск}} = 30$ кВ

Интенсивность рентгеновского излучения пропорциональна плотности материала мишени (свариваемых деталей). В стыке плотность материала меньше, и часть электронов луча испытывает меньшее торможение, поэтому при отсутствии оплавления и точном расположении луча на стыке оказывается минимальная интенсивность рентгеновского излучения (см. рис. 3).

Относительные изменения интенсивности рентгеновского излучения при минимальных зазорах ($\Delta \leq 0,01$ мм) составляют около 5 % и менее. Это свидетельствует о необходимости специальных методов обработки сигнала датчика для выделения информации о положении луча относительно стыка и получения удовлетворительного соотношения сигнал/помеха в условиях ЭЛС.

Незначительные колебания кривых связаны с неровностями поверхности свариваемых деталей, из-за которых проявляется зависимость интенсивности рентгеновского излучения от угла падения электронного луча на поверхность.

В случае сварочного режима рентгеновское излучение исходит из дна канала проплавления и регистрируется датчиком с площади, определяемой размерами канала. При этом часть излучения на пути к датчику ослабляется слоем свариваемого материала, определяемого глубиной проплавления. В пределах зазора излучение не ослабляется. В связи с этим зависимости имеют экстремум – максимум (см. рис. 4).

С уменьшением глубины проплавления увеличивается постоянная составляющая сигнала датчика, т.е. увеличивается уровень регистрируемого излучения. Это связано с уменьшением толщины материала, ослабляющего рентгеновское излучение.

Относительные изменения интенсивности рентгеновского излучения при различных зазорах и глубинах проплавления представлены в таблице.

Относительные изменения интенсивности рентгеновского излучения

Глубина проплавления, мм	$\frac{J(0)}{J(0,5)} 100\% ^*$			
	$\Delta = 0,01$ мм	$\Delta = 0,05$ мм	$\Delta = 0,1$ мм	$\Delta = 0,2$ мм
5	2	12	24	43
10	3	16,5	33,5	61
25	3,5	19	36	65

* $J(0)$ – интенсивность рентгеновского излучения при $\varepsilon = 0$ (координаты луча и стыка совпадают); $J(0,5)$ – интенсивность рентгеновского излучения при $\varepsilon = \pm 0,5$ мм (луч смещен относительно стыка на 0,5 мм).

Из графиков и таблицы видно, что при зазорах в стыке, меньших 0,01 мм, относительные изменения интенсивности могут оказываться менее 1 %, что представляет известные трудности для выделения полезной информации.

С увеличением зазора относительные изменения интенсивности излучения увеличиваются (см. рис. 4, б-г). Это объясняется увеличением площади пространства, проходя через которое рентгеновское излучение не ослабляется.

Увеличение относительного изменения интенсивности с увеличением глубины проплавления связано с увеличением разницы в значениях интенсивностей неослабленного и ослабленного рентгеновского излучения (ослабление увеличивается, а неослабленное излучение практически не изменяется).

По результатам экспериментов можно оценить частоту колебаний. Графики (см. рис. 4) построены в реальном масштабе времени. Разворачивая осциллограммы по времени, можно определить количество колебаний при прохождении лучом известного расстояния. Измерения показали, что среднестатистическая частота колебаний при ЭЛС алюминиевого сплава составляет 63–64 Гц. Скорость поперечного перемещения луча составляет 2 мм/с. Колебания интенсивности РИ свидетельствуют о нестабильности положения луча в канале.

Сделаем следующие выводы:

1. Экстремальный характер зависимости интенсивности рентгеновского излучения от положения луча относительно стыка определяет возможность использования известных способов поиска экстремума для реализации автоматического наведения луча на стык.

2. Результаты экспериментальных исследований дают возможность оценивать адекватность соответствующих математических моделей.

3. Колебания рентгеновского излучения связаны с гидродинамическими процессами в канале проплавления.

Получено 1.11.2013

Браверман Владимир Яковлевич — доктор технических наук, доцент, Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М.Ф. Решетнева (660014, Красноярский край, г. Красноярск, пр. им. Газеты «Красноярский рабочий», 31, e-mail: braverman-vladimir@rambler.ru).

Белозерцев Владимир Семенович — кандидат технических наук, доцент, Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М.Ф. Решетнева (660014, Красноярский край, г. Красноярск, пр. им. Газеты «Красноярский рабочий», 31, e-mail: belozerczev.v@yandex.ru).

Braverman Vladimir Jakovlevich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Siberian State Aerospace University named after Academician M. Reshetnev, Krasnoyarsk (660014, Krasnoyarsk Region, Krasnoyarsk, “Krasnoyarskiy rabochiy” av., 31, e-mail: braverman-vladimir@rambler.ru).

Belozertsev Vladimir Semenovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Siberian State Aerospace University named after Academician M. Reshetnev, Krasnoyarsk (660014, Krasnoyarsk Region, Krasnoyarsk, “Krasnoyarskiy rabochiy” av., 31, e-mail: belozerczev.v@yandex.ru).