

УДК 621.791.72

**СЛЕЖЕНИЕ ЗА СТЫКОМ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ  
В АТМОСФЕРЕ**

В. Я. Браверман, Т. Г. Вейсвер, В. С. Белозерцев

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: braverman-vladimir@rambler.ru

*Рассматриваются методы позиционирования луча по стыку при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) разнородных материалов в атмосфере. При ЭЛС в атмосфере традиционные способы автоматического наведения луча на стык оказываются неприемлемыми из-за значительного рассеяния электронов и невозможности отклонения луча в объеме электронно-лучевой пушки в связи со шлюзовой конструкцией последней. Для осуществления слежения за стыком используют магнитные поля токов в деталях, образованных током луча. При ЭЛС однородных материалов результирующее магнитное поле токов пропорционально смещению луча относительно стыка. При ЭЛС разнородных материалов поле отлично от нуля при нахождении луча на стыке. Предлагается метод компенсации погрешности совмещения луча со стыком.*

*Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, ток электронного луча, магнитное поле токов в деталях, отклонение луча, стык свариваемых деталей.*

**SEAM TRACKING DURING ELECTRON BEAM WELDING IN AIR**

V. Ya. Braverman, T. G. Veisver, V. S. Belozertsev

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation  
E-mail: braverman-vladimir@rambler.ru

*We study the methods of beam positioning at the joint during the Electron Beam Welding of dissimilar materials in the air. Traditional methods of automatic beam positioning at the joint are unacceptable in this type of welding because of the significant dispersion of electrons and the impossibility of the beam deviation inside the electron beam gun due to presence of an airlock. Magnetic fields of the current in the welded parts created by the beam's current are used to monitor the joint. During the electron beam welding of similar materials, the resulting magnetic field of the currents is proportional to the beam movement relative to the joint. However, this proportional relation no longer applies during the electron beam welding of dissimilar materials. We are proposing a method to compensate for the error in aligning the beam with the joint.*

*Keywords: electron beam welding, electron beam current, magnetic field of the current in welded parts, beam deviation, joint of the welded part.*

При электронно-лучевой сварке (ЭЛС) в атмосфере традиционные способы автоматического позиционирования луча по стыку свариваемых деталей оказываются неприемлемыми из-за сильного рассеяния электронов в воздухе и невозможности отклонения электронного луча в объеме электронно-лучевой пушки в связи со шлюзовой конструкцией последней. Для осуществления слежения за стыком в процессе ЭЛС предлагается использовать магнитные поля токов в деталях, образованных током электронного луча [1].

При различных положениях луча относительно стыка происходит перераспределение составляющих сварочного тока (тока луча) и вызванных ими магнитных полей (рис. 1). В результате появляются составляющие магнитного поля, несущие информацию о положении луча относительно стыка.

Ток луча  $I_n$  с помощью токосъемов разделяется на две составляющие  $I_1$  и  $I_2$ . Если луч расположен точно

над стыком, то напряженности магнитных полей  $H_1$  и  $H_2$  (в том числе их вертикальные составляющие  $H_{1В}$  и  $H_{2В}$ ) равны по величине и направлены противоположно (рис. 1, а). Результирующее магнитное поле в этом случае определяется током луча  $I_n$ , а вектор напряженности этого поля  $H_n$  расположен в горизонтальной плоскости.

При отклонении луча от стыка (рис. 1, б) на пути составляющей  $I_2$  тока луча  $I_n$  оказывается заваренный участок, и напряженность магнитного поля, вызванного током  $I_2$  изменится на величину  $\Delta H$ , обусловленную прохождением тока  $I_2$  по этому участку. Результирующее магнитное поле определяется вертикальной составляющей напряженности  $\Delta H$  и горизонтальной составляющей  $H_n$ . При отклонении луча в противоположную сторону заваренный участок оказывается на пути тока  $I_1$ , и напряженность магнитного поля, вызванного током  $I_1$ , изменится на величину  $-\Delta H$ , обу-

словленную прохождением тока  $I_1$  по этому участку. Результирующее магнитное поле определяется вертикальной составляющей напряженности  $-\Delta H$  и горизонтальной составляющей  $H_{св}$ . Таким образом, вертикальная составляющая магнитного поля несет информацию о положении луча относительно стыка. Если для измерения магнитного поля применять, например, дифференциальный феррозонд [2], ось чувствительности которого расположена в вертикальной плоскости, то можно формировать сигнал, пропорциональный смещению луча со стыка и использовать его для коррекции положения луча.

Аналитическое определение зависимости напряженности магнитного поля от величины отклонения луча от стыка осуществлено на трехмерной модели, отражающей процесс ЭЛС с позиции «электромагнитных» свойств около лучевого пространства, ограниченного в плоскости свариваемых деталей.

Моделирование состояло в совместном решении уравнений Максвелла:

$$\begin{cases} \operatorname{rot}\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial D}{\partial t}, \operatorname{rot}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ \operatorname{div}\vec{D} = \rho, \operatorname{div}\vec{B} = 0, \\ D = \varepsilon_0 \varepsilon E; B = \mu_0 \mu H; j = \gamma E, \end{cases}$$

где  $E$  – напряженность электрического поля;  $D$  – поле смещения (электрический поток);  $H$  – напряженность магнитного поля;  $j$  – плотность тока;  $\rho$  – плотность объемного заряда;  $B$  – магнитная индукция;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $\mu$  – магнитная проницаемость;  $\gamma$  – электрическая проводимость;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума.

Расчет проведен в пакете программ Comsol Multiphysics.

На рис. 2 приведены результаты расчета при сварке деталей из сплава АМг-6 толщиной  $\delta = 10$  мм при  $I_л = 300$  мА и скорости сварки  $V_{св} = 40$  м/ч. Видно, что при отсутствии смещения луча распределение составляющих сварочного тока  $I_1$  и  $I_2$  симметрично относительно линии стыка (рис. 2, а). При отклонении луча от стыка симметрия нарушается (рис. 2, б).

Обоснована возможность определения положения электронного луча относительно стыка по распределению магнитного поля токов, протекающих по свариваемым деталям при ЭЛС без ограничений, связанных с необходимостью использования специальных токоподводов.

Магнитное поле в окололучевой зоне создается в основном полем токов в свариваемом изделии, а также намагниченностью изделия и оснастки и магнитным полем Земли. Если луч расположен точно над стыком (рис. 3, а), то напряженности магнитных полей (в том числе их вертикальные составляющие  $H_{z1}$  и  $H_{z2}$ ), вызванные элементарными токами  $I_1$  и  $I_2$ , равны по величине и направлены противоположно:

$$H_{z1} - H_{z2} = 0.$$

При отклонении луча от стыка (рис. 3, б) на пути элементарного тока  $I_2$  оказывается заваренный участок, и напряженность магнитного поля, вызванного током  $I_2$ , станет больше на величину  $\Delta H$ , обусловленную прохождением элементарного тока  $I_2$  по этому участку. Результирующее магнитное поле будет определяться вертикальной составляющей напряженности  $\Delta H$ .

Установлена зависимость вертикальной составляющей магнитного поля от токов при отсутствии ограничений, связанных с необходимостью применения специальных токоподводов. Это подтверждено расчетами путем численного моделирования сварки на основе уравнений Максвелла в пакете программ Comsol Multiphysics.

Получение частного решения соответствующей краевой задачи осуществлялось путем ее конечно-элементной аппроксимации заданной точности с последующим применением итерационного метода. Расчет проведен при варьировании смещения электронного луча, превышения кромок, при сварке разнородных материалов (алюминий, сталь и медь), при разнице размеров деталей, при наличии прихваток в условиях локального термического равновесия в зоне термического влияния.

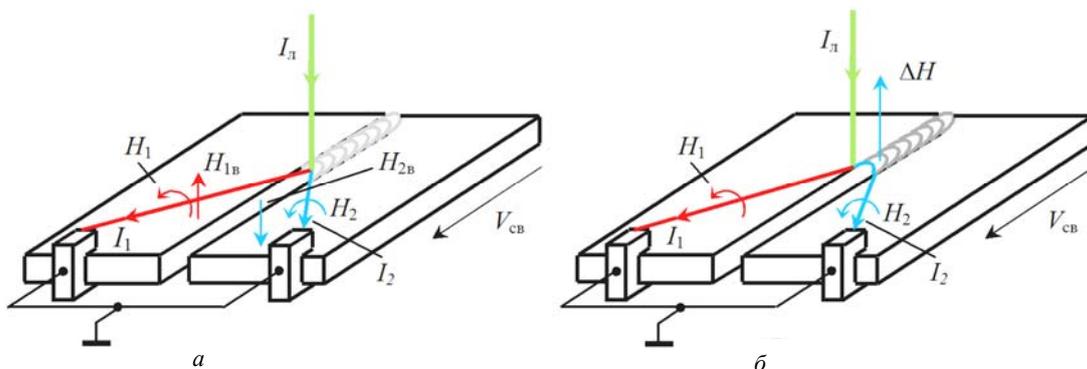


Рис. 1. Схема возникновения вертикальной составляющей магнитного поля  $\Delta H$  при отклонении луча от стыка

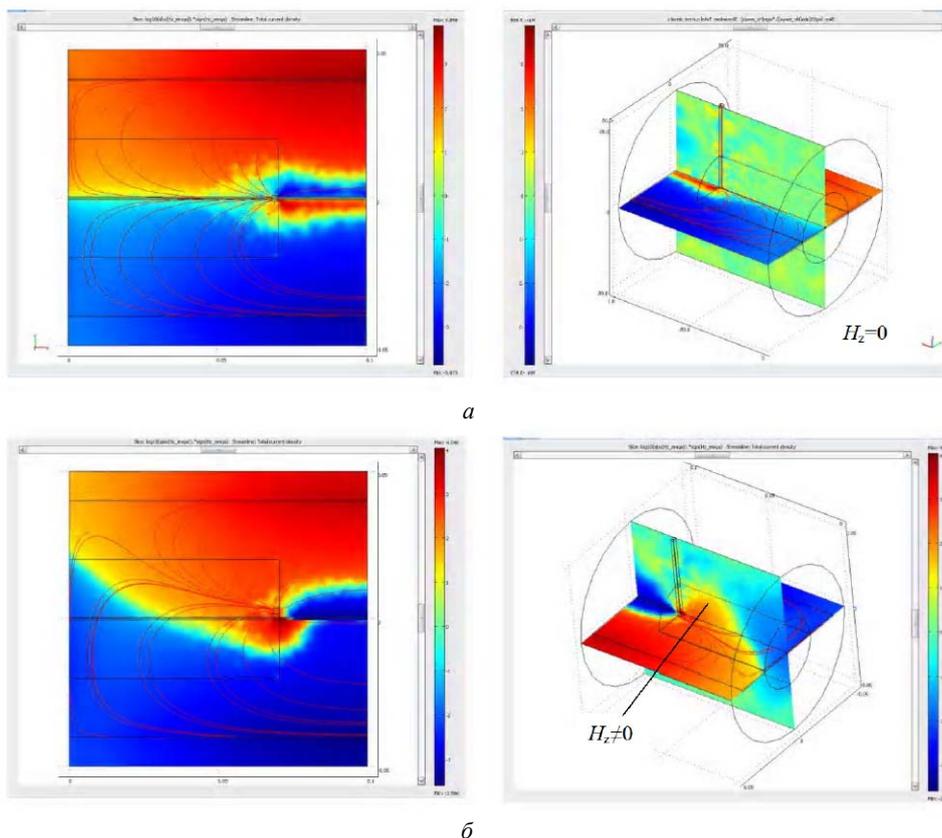


Рис. 2. Распределение токов и магнитных полей:  $H(z)$  – вертикальная составляющая магнитного поля;  $a$  – смещение луча нет;  $b$  – луч смещен относительно стыка на 0,5 мм

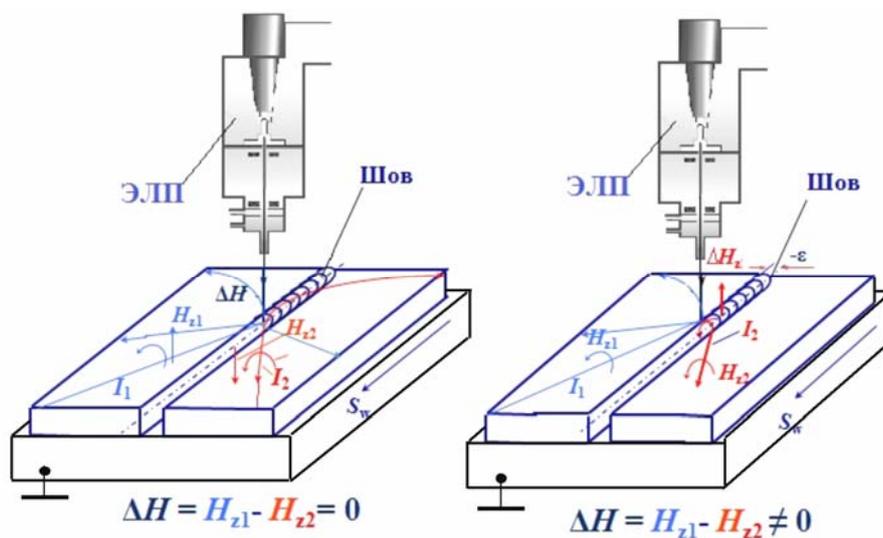


Рис. 3. Способ определения отклонения электронного луча от стыка без специальных токоподводов

На рис. 4 представлены результаты расчетов для сварки деталей из АМг-6 толщиной 10 мм при токе луча 0,1 А, ускоряющем напряжении 175 кВ. По условиям моделирования задано, что токоподводом является металлическая плита, на которой находятся свариваемые детали. При совпадении электронного луча со стыком при сварке идентичных деталей распределение полей симметрично относительно стыка изделия.

При ЭЛС разнородных материалов распределение токов меняется из-за разницы сопротивлений и магнитной проницаемости материалов. В результате при отсутствии отклонения луча от стыка имеется вертикальная составляющая магнитного поля (рис. 5).

Для правильной работы системы управления необходимо задать корректирующую уставку для компенсации сигнала на входе системы при нахождении луча на стыке. Эта уставка суммируется с входным сигналом.

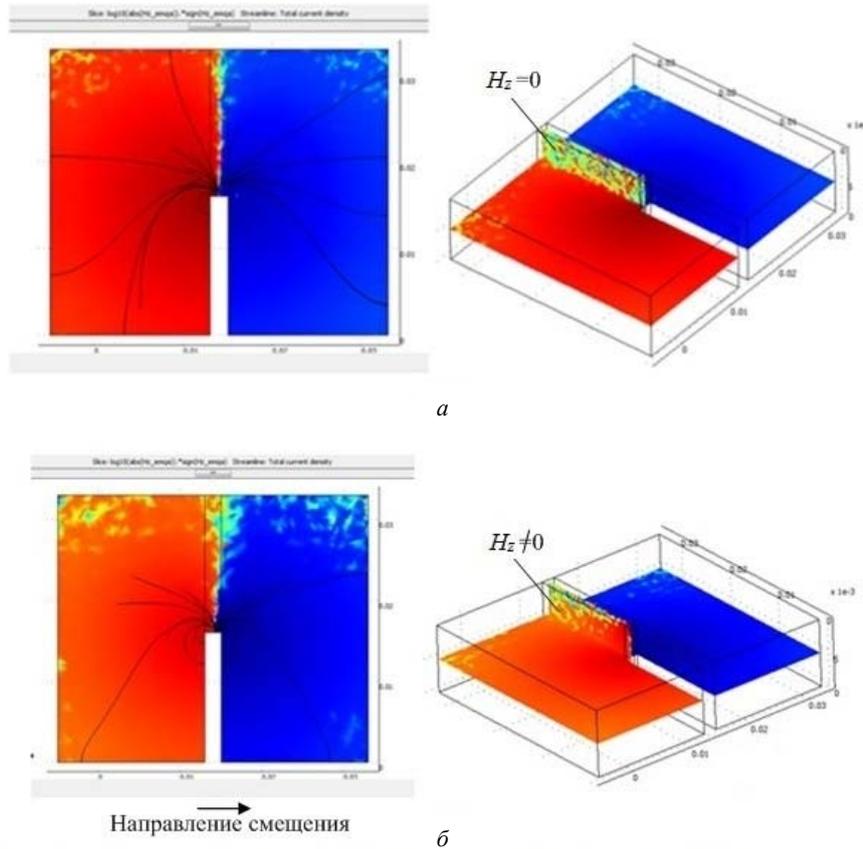


Рис. 4. Распределение токов и магнитных полей в изделии при электронно-лучевой сварке идентичных деталей: *а* – смещения луча нет; *б* – луч смещен вправо на 0,5 мм

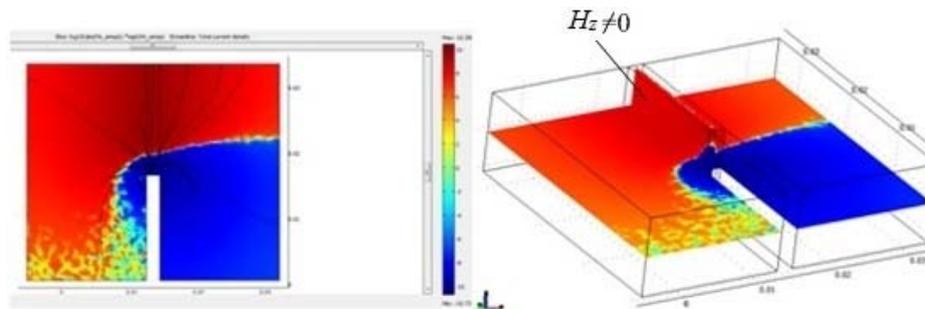


Рис. 5. Распределение токов и магнитных полей в изделии при электронно-лучевой сварке разнородных металлов без смещения: сталь (слева), медь (справа)

Вертикальная составляющая магнитного поля  $\Delta H$ , в соответствии с принципом суперпозиции и законом Био-Савара–Лапласа, рассчитывается путем интегрирования длин радиусов-векторов, соединяющих точку измерения с последовательно расположенными точками вдоль детали, по расстоянию от точки измерения до границ деталей. При идентичности размеров, конфигурации и материалов свариваемых деталей выражение для  $\Delta H$  имеет вид

$$\Delta H = \frac{I}{4\pi l} \frac{\varepsilon}{\sqrt{h^2 + l^2 + 4l\varepsilon + 4\varepsilon^2}},$$

где  $I$  – ток луча;  $l$  – ширина деталей;  $\varepsilon$  – величина смещения электронного луча от стыка;  $h$  – высота

расположения датчика над плоскостью свариваемых деталей.

Видно, что зависимость  $\Delta H$  от  $\varepsilon$  в некотором диапазоне смещений линейна.

На рис. 6 представлена функциональная схема устройства для автоматического наведения луча на стык при ЭЛС в атмосфере.

В качестве датчика рассогласования положений луча и стыка использован дифференциальный феррозонд [2]. Для повышения помехозащищенности системы сигнал рассогласования положений луча и стыка формируется на боковой частоте  $(2\omega + \Omega)$ , где  $\omega$  – частота возбуждения феррозонда,  $\Omega$  – частота модуляции тока электронного луча. Для этого выход измерительной

обмотки ( $W_{и}$ ) феррозонда подключен к избирательному усилителю (ИУ), настроенному в резонанс на частоту  $(2\omega + \Omega)$ . Далее сигнал преобразуется демодулятором (ДМ), опорный вход которого подключен к генератору  $(2\omega + \Omega)$ . После фильтрации (фильтром Ф) постоянное напряжение, пропорциональное рассогласованию положений луча и стыка, через усилитель (У) поступает на вход привода (П) перемещения электронно-лучевой пушки (ЭЛП), которая перемещается (вместе с лучом) до устранения рассогласования.

В устройство введен канал компенсации постоянных и медленно меняющихся магнитных полей ( $H_0$ ) в объеме феррозонда. Эти поля могут быть вызваны намагниченностью свариваемых деталей, осадки и могут привести к насыщению сердечников феррозонда. При возникновении этих полей в спектре сигнала измерительной обмотки ( $W_{и}$ ) появляется составляющая с частотой  $2\omega$ , амплитуда которой пропорциональна величине поля, а фаза определяет направление поля. Эта составляющая выделяется избирательным усилителем, настроенным в резонанс на частоту  $2\omega$ .

Затем сигнал выпрямляется демодулятором, опорный вход которого подключен к генератору частоты  $2\omega$  и через фильтр и усилитель в виде напряжения постоянного тока поступает в компенсационную обмотку ( $W_k$ ), в которой формируется магнитное поле ( $H_k$ ), компенсирующее действие внешних полей ( $H_0$ ) в объеме феррозонда.

Сигнал модуляции тока электронного луча с частотой  $\Omega$  формируется смесителем (СМ), на входы которого поступают сигналы с генераторов частот  $2\omega$  и  $(2\omega + \Omega)$ . Сигнал возбуждения феррозонда формируется делителем частоты на 2, вход которого связан с выходом генератора частоты  $2\omega$ . Сигнал возбуждения подается на обмотку возбуждения  $W_{в}$  феррозонда.

Устройство испытано на электронно-лучевой установке ЭЛУ-9Б с энергокомплексом ЭЛА 60/15. Погрешность совмещения луча со стыком не превышала 0,3 мм, что оказывается вполне приемлемым для ЭЛС в атмосфере.

На рис. 7 представлены макрошрифты соединений, полученных при слежении за стыком и без слежения.

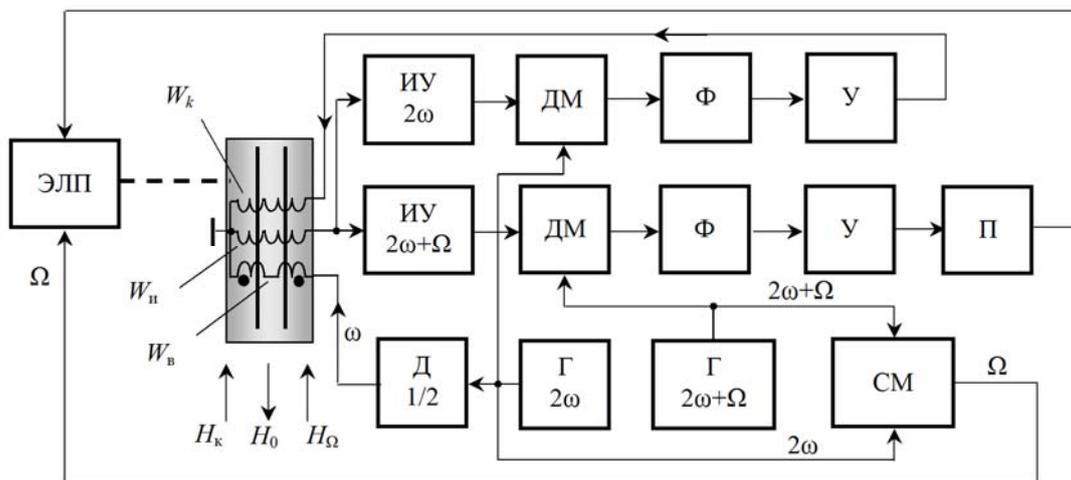


Рис. 6. Функциональная схема системы автоматического наведения луча на стык

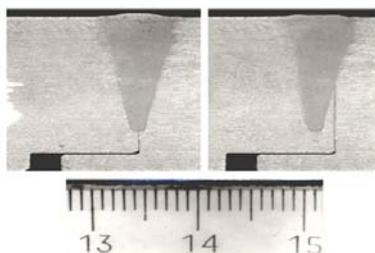


Рис. 7. Образцы швов, полученные при ЭЛС деталей из АМг-6 с наведением луча на стык (слева) и без наведения (справа)

В результате проведенных исследований установлено, что вертикальная составляющая магнитного поля токов в деталях несет информацию о положении луча относительно стыка, позволяет контролировать фактическое положение луча и корректировать с помощью системы автоматического управления.

**Библиографические ссылки**

1. Браверман В. Я., Белозерцев В. С. Устройство для слежения за стыком свариваемых деталей с датчиком магнитного поля // Вестник СибГАУ. 2008. № 3 (20). С. 106–108.
2. Афанасьев Ю. В. Феррозонды. Л. : Энергия, 1969. 168 с.

**References**

1. Braverman V. Ya., Belozrtsev V. S. *Vestnik SibGAU*. 2008. № 3 (20), p. 106–108.
2. Afanasyev Yu. V. *Ferrozondy* (Flux gates). Leningrad, Energiya Publ., 1969. 168 p.

© Браверман В. Я., Вейсвер Т. Г., Белозерцев В. С., 2014

УДК 621.317.444

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВИБРАЦИОННЫЙ МАГНИТОМЕТР С ЭЛЕКТРОМАГНИТОМ КОНСТРУКЦИИ ПУЗЕЯ

Д. А. Великанов

Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/38  
Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79  
E-mail: dponal@gmail.com

*Описан вибрационный магнитометр, предназначенный для исследования статических магнитных свойств разнообразных твёрдых образцов в магнитных полях до  $\pm 25$  кЭ. Источником магнитного поля служит электромагнит конструкции И. М. Пузея. Температура исследуемого образца изменяется в диапазоне 77–370 К с помощью проточного криостата. Магнитные измерения проводятся прямым методом. Механические колебания образца создаются вибратором оригинальной конструкции, относительная нестабильность амплитуды колебаний составляет  $10^{-4}$ , а частоты –  $10^{-5}$ . Регистрация полезного сигнала осуществляется системой из четырёх приёмных катушек. Вибрационный магнитометр позволяет снимать магнитопольевые, температурные и угловые зависимости магнитного момента. Динамический диапазон прибора составляет  $5 \cdot 10^{-6}$ –100 Гс·см<sup>3</sup>.*

*Ключевые слова: вибрационный магнитометр, электромагнит, вибратор, криостат, магнитный момент, динамический диапазон.*

## AUTOMATED VIBRATING SAMPLE MAGNETOMETER WITH PUZEY ELECTROMAGNET

D. A. Velikanov

Institute of Physics named after L. V. Kirensky, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
50/38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
Siberian Federal University  
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation  
E-mail: dponal@gmail.com

*Vibrating sample magnetometer to study the static magnetic properties of various solid samples in magnetic fields up to  $\pm 25$  kOe is described. The source of the magnetic field is an electromagnet designed by I. M. Puzey. The temperature of the investigated sample varies from 77–370 K by flow cryostat. Magnetic measurements were performed by the direct method. Mechanical vibrations of the sample are created by a vibrator of the original design. The relative instability of the oscillation amplitude is  $10^{-4}$ , and frequency –  $10^{-5}$ . Registration of useful signal is carried out by the system consisting of four pickup coils. The vibrating sample magnetometer allows to receive the magnetic-field, temperature and angular dependencies of the magnetic moment. The dynamic range of the device is  $5 \cdot 10^{-6}$ –100 emu.*

*Keywords: vibrating sample magnetometer, electromagnet, vibrator, cryostat, magnetic moment, dynamic range.*

Среди различных методов магнитных измерений (рис. 1) метод вибрационного магнитометра, относящийся к индукционному типу, занимает достойное место, уступая по чувствительности лишь СКВИД-магнитометрам (эффект Джозефсона) [1; 2] и магнитометрам, основанным на «оптической накачке» атомов в магнитном поле (эффект Зеемана) [3; 4].

Действительно, СКВИД-магнитометры на сегодняшний день наиболее чувствительные приборы: энергетическое разрешение достигает  $5 \cdot 10^{-33}$  Дж/Гц, чувствительность по магнитному полю составляет  $\sim 10^{-14}$  Тл, а по магнитному моменту  $\sim 10^{-8}$  Гс·см<sup>3</sup> (emu). Благодаря этому они находят всё более широкое при-

менение в физическом эксперименте. Тем не менее, эксплуатация СКВИДов сопряжена с существенными неудобствами: прежде всего, их работоспособность всецело зависит от наличия криообеспечения; предъявляются повышенные требования к стабилизации магнитного поля и качеству экранирования как измерительной ячейки, так и самого СКВИДа; необходимо периодически откачивать газы из сосудов Дьюара; высока стоимость получения жидкого гелия.

Что касается магниточувствительных датчиков с оптической накачкой, они весьма удобны с точки зрения эксплуатации, имеют высокую чувствительность, сравнительно небольшие размеры, хорошо ра-