

- [18] З л а т и н Н.А., К о ж у ш к о А.А., Р ы к о в а И.И. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. № 16. С. 1498-1500.
- [19] Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочник в 4-х томах, М.: Наука, 1982.
- [20] Р е г е л ь В.Р., С л у ц к е р А.И., Т о м а ш е в с к и й Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел, М.: Наука, 1974. 520 с.

Поступило в Редакцию
10 мая 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 22 26 ноября 1989 г.
12

СПОНТАННЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ

К.С. А к о п ь я н ц, С.М. Л е в и т с к и й,
О.К. Н а з а р е н к о, В.Ю. Н е п о р о ж н и й,
Г.А. Ш и л о в

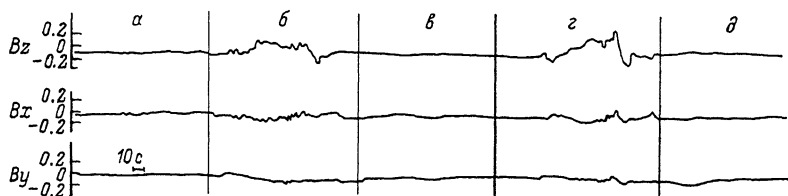
Существование неконтролируемых магнитных полей в непосредственной близости от пучка электронов при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) деформирует сечение пучка, нарушая его фокусировку, и, главное, искривляет ось пучка, снижая тем самым точность ее совмещения со стыком свариваемых кромок.

Вопросам предотвращения остаточной намагниченности свариваемого изделия и сборочно-сварочной оснастки, а также взаимодействию пучка с током термо-ЭДС при сварке разнородных материалов уделено достаточное внимание [1], эти явления в полной мере учитываются в практике ЭЛС.

Однако даже при сварке однородных материалов нами было обнаружено в окрестности сварочной ванны самопроизвольное возникновение магнитных полей величиной до одного и более гаусс, существенно (на порядок) превосходящих магнитные поля, которые могут быть обусловлены самим током пучка. Эти магнитные поля создают также и остаточное намагничивание, что заметно затрудняет точное наложение повторных (ремонтных) швов на ранее выполненный шов.

Для изучения свойств и природы таких спонтанных магнитных полей нами и были предприняты описанные ниже эксперименты.

Измерения проводились в промышленной установке для ЭЛС, камера которой изготовлена из стали ст. 3. Магнитные поля измерялись с помощью феррозонда [2] чувствительностью 100 мВ/Гс, окруженного водоохлаждаемой медной рубашкой с целью защиты от теплового излучения сварочной ванны. Наружные габариты этой конструкции: ϕ 40 мм, высота 30 мм при наружных габаритах самого феррозонда ϕ 20 мм, высоте 15 мм. Расстояния от центра из-



Изменение составляющих остаточного магнитного поля без воздействия пучка электронов (а, в, д) и спонтанного магнитного поля при воздействии пучка электронов 60 кВ, 450 мА (б, г) на пластину стали 12Х2НЧМД при ее перемещении относительно феррозонда.

мерительной системы феррозонда до оси пучка и до плоскости свариваемого образца составляли 25 и 15 мм соответственно. Феррозонд крепился к торцу сварочной пушки. При сварке образец поступательно перемещался относительно электронного пучка (феррозонда) со скоростью 2,67 мм/с. При прямом движении образца феррозонд оказывался впереди сварочной ванны, при обратном движении — позади нее. Одновременно регистрировались три составляющие магнитного поля; при этом за ось Z принималось направление, параллельное оси пучка (нормальное к поверхности образца), за ось x — направление вдоль шва, за ось y — перпендикулярно ему. Свариваемый образец представлял собой пластину 300х400х60 мм. Энергия электронов пучка во всех экспериментах составляла 60 кэВ, ток пучка мог варьироваться в диапазоне 10^{-3} –1 А. Было проверено, что при токе пучка в 1 А вызванные им показания феррозонда Vx и Vz лежат ниже предела обнаружения, а Vy составляет $\sim 0,06$ Гс, что соответствует оценке величины магнитного поля в точке, удаленной на расстояние 3 см от проводника с током 1 А.

Результаты измерений при ЭЛС образца ферромагнитной стали марки 12х2Н4МД представлены на прилагаемом рисунке. Здесь в столбце „а” показаны все три компоненты магнитного поля, измеренные при обратном проходе, до начала сварки. Поскольку образец был предварительно размагничен нагревом до 900 °С, а стенки камеры экранируют феррозонд от магнитного поля земли, измеренные компоненты близки к нулю.

В столбце „б” показаны компоненты магнитного поля при сварке током 450 мА и прямом движении образца. Как видно, магнитное поле по всем трем компонентам испытывает нерегулярные изменения как по знаку, так и по абсолютной величине в пределах +0,1–0,2 Гс. В столбце „в” зафиксированы компоненты поля, измеренные при выключенном токе пучка во время возврата образца в исходное положение.

Результаты, приведенные в столбце „г“, получены при наложении повторного шва на ранее выполненный. Эти кривые не повторяют аналогичных кривых цикла „б“; наблюдаемые изменения магнитного поля оказываются даже несколько больше, чем в предыдущем сварочном цикле — до $+0,4-0,3$ Гс. Изменения магнитного поля носят в основном нерегулярный и невоспроизводимый характер, хотя в некоторых случаях удается усмотреть корреляцию между отдельными компонентами в одном проходе или изменениями одной из компонент в нескольких последовательных проходах. При большом числе проходов величина наблюдаемого магнитного поля может как увеличиваться, так и ослабляться. В столбце „д“ приведены данные при обратном ходе образца с выключенным пучком.

При электронно-лучевой сварке изделий из ферромагнитных материалов, предварительно не намагниченных и имеющих остаточную намагниченность ~ 1 Гс, наблюдается существенное перераспределение и даже увеличение этой остаточной намагниченности. Ответственными за это, очевидно, являются спонтанные магнитные поля.

Возникновение спонтанных магнитных полей характерно не для одних лишь ферромагнитных образцов. Спонтанные магнитные поля, подобные описанным выше, были получены и на заведомо неферромагнитных образцах из бронзы БЖ и БрХ, причем на бронзе БрХ (1% хрома) поля были даже более сильно выраженными, чем на стали — до $+2$ Гс. В отличие от этого на образцах из чистой меди и алюминия заметных спонтанных магнитных полей не наблюдалось.

Качественно аналогичный эффект, но более слабо выраженный, был обнаружен также на образце из хромистой бронзы при замене электронного луча остро направленным пламенем ацетиленовой горелки.

Характер наблюдавшихся эффектов указывает, по-видимому, на термотоктовую природу источников генерации спонтанного магнитного поля, которое возникает при перемещении электронов в образце под воздействием сильных температурных градиентов.

В частности, источником термотокков могут быть случайные локальные неоднородности материала образца, чем и объясняется нерегулярность возникающего поля, а также то, что оно наблюдается по преимуществу при ЭЛС сплавов, а не чистых металлов. Невоспроизводимость циклов может быть связана с тем, что при каждом проваре распределение неоднородностей изменяется.

Оценки показывают, что при тех сильных температурных градиентах, которые имеют место при ЭЛС, термо-ЭДС, возникающие на возможных неоднородностях материалов образца, способны вызывать в объеме последнего токи порядка десятков ампер, достаточные для создания наблюдающихся спонтанных магнитных полей.

Для предотвращения неконтролируемого отклонения пучка электронов спонтанным магнитным полем в сторону от стыка свариваемых кромок рекомендуется экранирование пучка в пространстве дрейфа [1]. Но более надежные результаты дает расширение самой литой зоны путем поперечной развертки пучка.

- [1] Назаренко О.К. // Автоматическая сварка, 1982. № 1. С. 33-39.
- [2] Преображенский А.А., Шамрай Б.В. Электромагнитные устройства информационно-измерительной техники. М.: Высшая школа, 1982. 263 с.

Институт электросварки
им. Е.О. Патона
АН УССР, Киев

Поступило в Редакцию
29 мая 1989 г.
В окончательной редакции
26 июля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 22
04; 09

26 ноября 1989 г.

КВАЗИОПТИЧЕСКИЙ ГРИЛЛ ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ НИЖНЕГИБРИДНОЙ ВОЛНЫ В ТОРОИДАЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ

М.И. Петелин, Е.В. Суворов

Для поддержания плазменного тока в токамаке в ряде случаев прибегают к однонаправленному возбуждению в плазме нижнегибридной волны системой выведенных на общую плоскость и сфазированных между собой излучающих волноводных срезов [1]. Поскольку полная апертура таких антенн по своим размерам, как правило, существенно превосходит длину волны, то для возбуждения нижнегибридной волны естественно попытаться использовать и квазиоптические методы.

Разумеется, если „полубесконечную“ замагниченную плазму осветить из вакуума однородной плоской волной $\vec{E}_i = \text{Re}(\vec{E}_{i0} e^{-i\omega t + ik_z \vec{r}})$, то нижнегибридная волна $\vec{E}_{lh} = \text{Re}(\vec{E}_{lh0} e^{-i\omega t + ik_{zh} \vec{r}})$ в плазме непосредственно возбудиться не может, поскольку ее касательная к поверхности раздела фазовая скорость меньше скорости света. Однако эти волны нетрудно связать, если поместить у поверхности плазмы периодическую систему (например, из металлических стержней, как на рис. 1), порождающую в волновом поле общие для обеих волн пространственные гармоники, для чего период этой системы – грилла – должен удовлетворять соотношению

$$k_{ix} - k_{lhx} = k_{gx} = 2\pi/d. \quad (1)$$

Среди бесконечного набора порождаемых гриллом пространственных гармоник, обладающих постоянными $k_{nx} = k_{ix} + nk_{gx}$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), ограниченное число составляют быстрые $|k_{nx}| < k$, а остальные являются медленными $|k_{nx}| > k$ (здесь $k = \frac{\omega}{c}$). Взяв период грилла достаточно малым $k_{gx} > k + k_{ix}$ (систему координат